



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MOŽNOSTI VYUŽITÍ AKUMULACE V DISTRIBUČNÍ SÍTI

POSSIBILITIES OF ACCUMULATION IN DISTRIBUTION NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Žižlavský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Jakub Žižlavský

ID: 203616

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Možnosti využití akumulace v distribuční síti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Technologie pro akumulaci elektrické energie - vlastnosti a provozní parametry
2. Definice okrajových podmínek pro využití akumulace v DS
3. Návrh technického řešení pro vybrané stavy DS
4. Technicko-ekonomické zhodnocení výsledného řešení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního
programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

ŽIŽLAVSKÝ, Jakub. *Možnosti využití akumulace v distribuční síti* [online]. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127281>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Petr Mastný.

Poděkování:

Děkuji doc. Ing. Petru Mastnému, Ph.D. za pomoc při vedení bakalářské práce. Mé poděkování patří též Ing. Michalu Juríkovi ze společnosti E.ON Distribuce, a.s. za spolupráci a pomoc při konzultacích.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Možnosti využití akumulace v distribuční síti jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 10.06.2020

.....

ABSTRAKT

Bakalářská práce na téma *Možnosti využití akumulace v distribuční síti* se zaměřuje na rozdělení druhů akumulace elektrické energie, druhy podpůrných služeb v distribuční síti. V závěru se zaměřuje na návrh a zhodnocení technického řešení pro vybrané stavy distribuční sítě.

KLÍČOVÁ SLOVA: Akumulace; Akumulace elektrické energie; Akumulátory; Distribuční síť; Elektrická energie; Podpůrné služby; Peak shaving; Start ze tmy

ABSTRACT

The Bachelor thesis on the *Possibilities of Accumulation in Distribution* Network focuses on the distribution of electric energy storage types. Then the most suitable candidate for the application of the accumulation of electricity in the distribution network will be selected and further work will be conceived according to the choice.

KEY WORDS: Energy storage; Storage units; Distribution grid; Electricity; Ancillary services; Peak shaving; Black start

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SLOVNÍK POJMŮ	11
1 ÚVOD	13
2 TECHNOLOGIE AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	14
2.1 ELEKTROMAGNETICKÉ	14
2.1.1 SUPERKAPACITORY.....	14
2.1.2 SUPRAVODIVÉ CÍVKY.....	15
2.2 TERMODYNAMICKÉ	16
2.2.1 AKUMULACE DO STLAČENÉHO VZDUCHU	16
2.2.2 AKUMULACE DO ROZTAVENÝCH SOLÍ.....	17
2.3 MECHANICKÉ	17
2.3.1 SETRVAČNÍKY.....	17
2.3.2 PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY (PVE)	18
2.4 CHEMICKÉ	19
2.4.1 AKUMULACE DO VODÍKU.....	19
2.5 ELEKTROCHEMICKÉ (BATERIOVÉ)	20
2.5.1 OLOVĚNÉ BATERIE.....	20
2.5.2 LITHIOVÉ BATERIE.....	21
2.5.3 PRŮTOKOVÉ BATERIE	25
POROVNÁNÍ AKUMULÁTORŮ.....	27
3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY PRO VYUŽITÍ AKUMULACE V DS.....	29
3.1 PODPŮRNÉ SLUŽBY (PPS)	29
3.1.1 SUBJEKTY POSKYTUJÍCÍ PODPŮRNÉ SLUŽBY V RÁMCI DS.....	29
3.2 SLUŽBY VÝKONOVÉ ROVNOVÁHY (SVR)	30
3.2.1 PROCES AUTOMATICKÉ REGULACE FREKVENCE (FCP)	30
3.2.2 AUTOMATICKY OVLÁDANÝ PROCES OBNOVENÍ FREKVENCE A VÝKONOVÉ ROVNOVÁHY (_A FRP)	30
3.2.3 RUČNĚ OVLÁDANÝ PROCES OBNOVENÍ FREKVENCE A VÝKONOVÉ ROVNOVÁHY (_M FRP _T)	31
3.2.4 PROCES NÁHRADY ZÁLOH RRP	31
3.3 OSTATNÍ PODPŮRNÉ SLUŽBY	31

3.3.1 SEKUNDÁRNÍ REGULACE U/Q (SRUQ).....	31
3.3.2 SCHOPNOST OSTROVNÍHO PROVOZU (OP).....	32
3.3.3 SCHOPNOST STARTU ZE TMY (BS)	33
3.4 PEAK-SHAVING (POKRÝVÁNÍ VÝKONOVÝCH ŠPIČEK)	34
3.5 MIKROVÝPADKY	36
4 NÁVRH TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ PRO VYBRANÉ STAVY DS	38
4.1 TECHNICKÁ SPECIFIKACE BATERIOVÉHO SYSTÉMU	38
4.2 FCP S MOŽNOSTÍ ODLEHČENÍ STÁVAJÍCÍHO ZATÍŽENÍ.....	40
4.3 ZAJIŠTĚNÍ VĚTŠÍHO VÝKONU PRO $mFRP_T$ (T=5 MIN).....	41
4.4 PEAK-SHAVING	42
4.5 MOŽNOST BS.....	43
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDNÉHO ŘEŠENÍ	44
6 ZÁVĚR.....	47
7 POUŽITÁ LITERATURA	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 All-In kontejnerové řešení [2]</i>	15
<i>Obr. 2-2 Řez supravodivou cívkou [3]</i>	16
<i>Obr. 2-3 Princip funkce akumulace do stlačeného vzduchu [3]</i>	17
<i>Obr. 2-4 Řez setrvačником [3]</i>	18
<i>Obr. 2-5 Princip PVE [3]</i>	19
<i>Obr. 2-6 Olověná baterie [21]</i>	20
<i>Obr. 2-7 Konstrukce Li-ion baterií [22]</i>	22
<i>Obr. 2-8 Struktura LMO [19]</i>	23
<i>Obr. 2-9 Průtočná baterie [26]</i>	26
<i>Obr. 2-10 Aktuálně vytvářený systém o výkonu 5-15 kW a kapacitě 50 kWh. [25]</i>	26
<i>Obr. 3-1 U/Q příklad regulační oblasti [31]</i>	32
<i>Obr. 3-2 Peak-shaving</i>	34
<i>Obr. 3-3 Denní odběrový diagram (snížení rezervovaného příkonu)</i>	35
<i>Obr. 3-4 Průběh denního výkonu na FVE (peak-shaving)</i>	36
<i>Obr. 3-5 Průběh mikrovýpadku [27]</i>	37
<i>Obr. 4-1 Ilustrační obrázek bateriové uložení připojené do DS s točivým zdrojem [31]</i>	40
<i>Obr. 4-2 Aplikace baterie na zvýšení výkonu pro MFRPt ($t=5$ min) [29]</i>	41
<i>Obr. 4-3 Denní diagram – snížení rezervované kapacity</i>	42

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Porovnání lithiových akumulátorů [19]</i>	27
<i>Tabulka 2 Porovnání akumulátorů [20]</i>	28
<i>Tabulka 3 Frekvenční limity pro ostrovní provoz [30]</i>	33
<i>Tabulka 4 Ceny za rezervovanou kapacitu [28]</i>	35
<i>Tabulka 5 Parametry bateriové stanice [29]</i>	38
<i>Tabulka 6 Výnosnost systému s měsíční rezervací</i>	45
<i>Tabulka 7 Výnosnost systému s roční rezervací</i>	45

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Směs akrylové pryskyřice a butadienová pryskyřice
_A FRP	Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací
AGM	Absorbed glass mat-S obsahem skleněných vláken
AS	akrylostyrénová pryskyřice
BS	Black start – start ze tmy
DoD	Depth of Discharge – Hloubka vybití
DS	Distribuční soustava
ERÚ	Energetický regulační úřad
FCP	Proces automatické regulace frekvence
FVE	Rotovoltaické elektrárny
LCO	Lithium Cobalt Oxide-Lithium kobalt
LFP	Lithium Iron Phosphate-Lithium-železo forfor
Li-ion	Lithium-ion – Lithium iont
LMO	Lithium Manganese Oxide-Lithium mangan
LTO	Lithium Titanate-Lithium-titan
_M FRP _T	Ručně ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide-Lithium nikl kobalt hliník
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide-Lithium-nikl mangan
OP	Ostrovní provoz
OZ	Opětovné zapnutí
PP	Polypropylén
PPE	Kopolymer polypropylénu s polypropylénem
PPS	Podpůrné služby
PS	Přenosová soustava
RRP	Proces náhrady záloh
SAN	styrolakrylnitril
SoC	State of Charge – Stav nabití
SoD	State of Discharge – Stav vybití
SoH	State of Health – Stav životnosti
SRUQ	Sekundární regulace U/Q
SVR	Služby výkonové rovnováhy
VE	Větrné elektrárny
VRB	Vanadium redox battery-Vanad redoxní baterie

SLOVNÍK POJMŮ

C – parametr (C-rate) (-)

Je definován jako:

$$c = \frac{\text{hodnota}(P)}{\text{hodnota}(C)} \quad (-; W; Wh) \quad (0.1)$$

Kde C je kapacita článku a P je jeho výkon.

Tento parametr udává, zda je baterie schopna se vybíjet krátkodobě ($c > 1$), nebo dlouhodobě ($c < 1$). Např. baterie s parametrem $c = 1$ je schopna se svým maximálním proudem vybíjet 1 hodinu, ale baterie s parametrem $c = 0,1$ je schopna se vybíjet až 10 hodin. Když je parametr $c > 1$ je tomu přesně naopak.

Účinnost baterie η (%)

Účinnost baterie je pojem, který udává, kolik % z uložené energie je baterie schopna dodat zpět. Zbytek energie je většinou přeměněn na teplo.

U bateriového systému jsou do těchto ztrát započítávány také ztráty na měničích, transformátorech, podpůrných a řídicích systémech. Zpravidla se jedná o hodnoty nad 80 %.

Stav nabití baterie (state of charge – SoC) (%)

Uvádí, kolik % energie z maximální možné je aktuálně v baterii.

Hloubka vybití baterie (depth of discharge – DoD) (%)

Jde o inverzní parametr k SoC. Uvádí, kolik % energie bylo z baterie vyčerpáno.

Životnost baterie (roky)

Jedná se o dobu, po kterou lze baterii provozovat bez ohrožení její funkčnosti.

Počet cyklů baterie (počet cyklů)

Kolik cyklů nabití, vybití a nabití je baterie schopna zvládnout, než dojde k ohrožení její funkčnosti. S tímto údajem bývá spojena i hodnota DoD, která se běžně udává mezi 80–100 %. Běžně se baterie nevybíjí až do nulové hodnoty, proto může být tento údaj navýšen.

Stav životnosti baterie (state of health – SoH) (%)

Tento parametr udává, kolik % energie můžeme v baterii uskladnit v porovnání s původní hodnotou. Obvykle se uvádí, když SoH dosáhne hodnoty kolem 80 %, je to považováno za konec její životnosti. To však neznamená, že se baterie již nedá používat, ale můžeme předpokládat, že brzy bude u konce své funkčnosti.

SoH je přímo úměrná stáří a počtu cyklů baterie.

Samovybíjení baterie (%)

Tato hodnota udává kolik % z uložené energie se vybije za daný časový úsek (většinou měsíc).

Měrný výkon (W/kg)

Udává, jaký výkon je baterie schopna vyvinout na jednotku hmotnosti.

Měrná energie (Wh/kg)

Udává, jakou energii je baterie schopna uložit na jednotku hmotnosti.

Napětí U (V)

Nominální napětí – Referenční hodnota, ze které se stanovuje jmenovitý výkon článku.

Napětí naprázdno – Napětí článku, který nenapájí žádnou zátěž, zpravidla se jedná o nejvyšší hodnotu napětí, která na článku vzniká, nedochází-li k jeho nabíjení.

Cut-off napětí – Nejnižší hodnota napětí, která se na článku může objevit, než dojde k jeho poškození.

Nabíjecí napětí – Optimální velikost napětí, při kterém by se měla baterie nabíjet do plné kapacity.

Udržovací napětí – Pokud je baterie plně nabita, je na ní toto napětí, které je maximální a kompenzuje samovybíjení.

1 ÚVOD

Bakalářská práce je zaměřena na možnosti využití akumulace elektrické energie. Toto téma se stává v posledních letech více aktuální než kdy předtím. S trendem zelené energie, kdy je do sítě zapojováno více elektráren s nestabilní dodávkou elektrické energie (FVE a VE), roste i poptávka po akumulaci elektrické energie sloužící k postupnému dodávání do sítě. Na druhé straně roste poptávka po systémových službách, které u nás ve většině případů mohou konat jen výrobní s točivými zdroji. V těchto výrobních je možné využít různé druhy akumulace pro různé podpůrné služby.

Jednotlivé druhy akumulace jsou dále popsány dle způsobu a schopnosti akumulovat v jakékoli podobě energii a v případě potřeby ji přeměnit na elektrickou. Ta nejvhodnější akumulace bude vybrána a aplikována na technické řešení, které bude dále prezentováno v této bakalářské práci.

Vybraná technologie pro akumulaci elektrické energie bude v závěru práce aplikována do systému, který bude za jistých podmínek plnit systémové služby. Tyto služby budou dále ekonomicky posouzeny a zhodnoceny.

2 TECHNOLOGIE AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Technologie pro akumulaci elektrické energie je velké množství, tato práce se zaměřuje zejména na druhy akumulací využívaných v České republice. Akumulace elektrické energie jsou děleny do několika podskupin dle jejich charakteru. Tyto druhy jsou podrobněji popsány v následujících bodech.

2.1 Elektromagnetické

Tento typ akumulace je založena na principu nahromadění elektrické energie do superkapacitoru, která je následně velmi rychle uvolněna, dále využívá supravodivé cívky, které jsou zchlazeny natolik, že nekladou protékajícímu proudu žádný odpor.

2.1.1 Superkapacitory

Celé téma na superkapacitory je z [1].

Superkapacitor neboli dvouvrstvý kondenzátor se od běžného kapacitoru liší svou velmi vysokou kapacitou. Energie je zde uchovávána pomocí statického náboje, který je zde nahromaděn a poté při požadavku na výkon je znovu vypuštěn. Elektrody jsou vyráběny na bázi uhlíku a elektrolyt je organického původu. Přiložením rozdílné úrovně napětí na elektrody dochází k nabíjení kondenzátoru. Jmenovité napětí jednoho kapacitorového článku je 2,5 až 2,7 V. Vyšší hodnoty jsou dovoleny na úkor jejich životnosti. Pro dosahování vyššího napětí jsou kapacitory řazeny do série.

Superkapacitory jsou využívány pro pokrytí špiček až v řádech sekund (nanejvýše minuty). V případě delšího využívání jsou lepší volbou baterie. Využívají se na pokrytí špiček při rozjíždění vlaků, při připojování velkého množství spotřebičů (i celých továren). Výkony těchto systémů dosahují až jednotky MW.

Velkou předností těchto systémů jsou velmi krátké reakční časy (až jednotky ms), rychlost nabíjení, velmi vysoký výkon systému, který nelze nijak přebíjet. Nevýhodou je velmi rychlé vybíjení oproti bateriím a značně vysoká cena za kWh. [1]

U nás je tato technologie používána např. již od roku 2018 v lakovně společnosti Škoda Auto v Mladé Boleslavi a Kvasínách (viz Obr. 2-1). Mladá Boleslav disponuje systémem o výkonu 1 MW pro případ výpadku až 1,5 s, při účinnosti $\geq 98\%$. Reakční doba je zde 20 ms a kapacita systému 0,42 kWh. Závod v Kvasínách využívá stejné technologie o výkonu 0,5 MW a dobou výpadku až 2 s. [2]



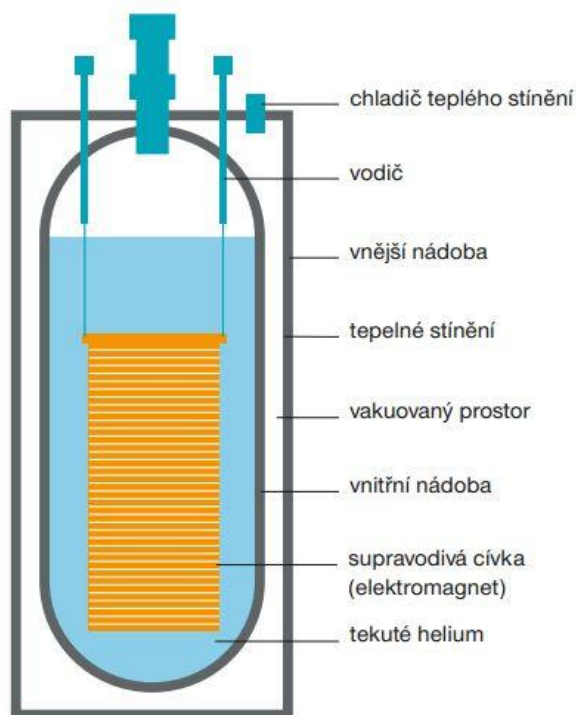
Obr. 2-1 All-In kontejnerové řešení [2] - převzato

2.1.2 Supravodivé cívky

Akumulace energie v supravodivé (indukční) cívce spočívá v přivedení velké měděné cívky (která musí být dimenzována na velké proudy) do stavu supravodivosti (průchod proudu vodičem nezpůsobuje žádné ztráty). Tohoto stavu se dosáhne tak, že se cívka ponoří do extrémně chladného média. [3] Pro nižší teploty se používá kapalné helium o teplotě $-268,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, pro teploty vyšší se volí tekutý dusík o teplotě $-195,79\text{ }^{\circ}\text{C}$. [4] Při akumulaci energie v cívce je použit stejnosměrný proud, který bývá pro další užití často přeměněn pomocí měniče na střídavý. [3]

Tato metoda akumulace je využívána pro menší výpadky, a to zejména tam, kde je důležitá stálá dodávka energie (výrobní mikročipů, polovodičových součástek, ...), dále mohou být využity pro vyrovnaní frekvence a zlepšení účinníku. Systémy dosahují výkonů až v řádech jednotek MW. [3]

Supravodivé cívky se mohou chlubit účinností až 95 %, velmi krátkou reakční dobou (0,2 mikrosekundy), krátkými vybíjecími a nabíjecími časy a dlouhou životností. Na druhou stranu jsou prostorově výraznější, jsou velice nákladné na výrobu (dobrý izolační materiál) a náklady na údržbu jsou zde také poměrně velké. [3]



Obr. 2-2 Řez supravodivou cívkou [3] - převzato

2.2 Termodynamické

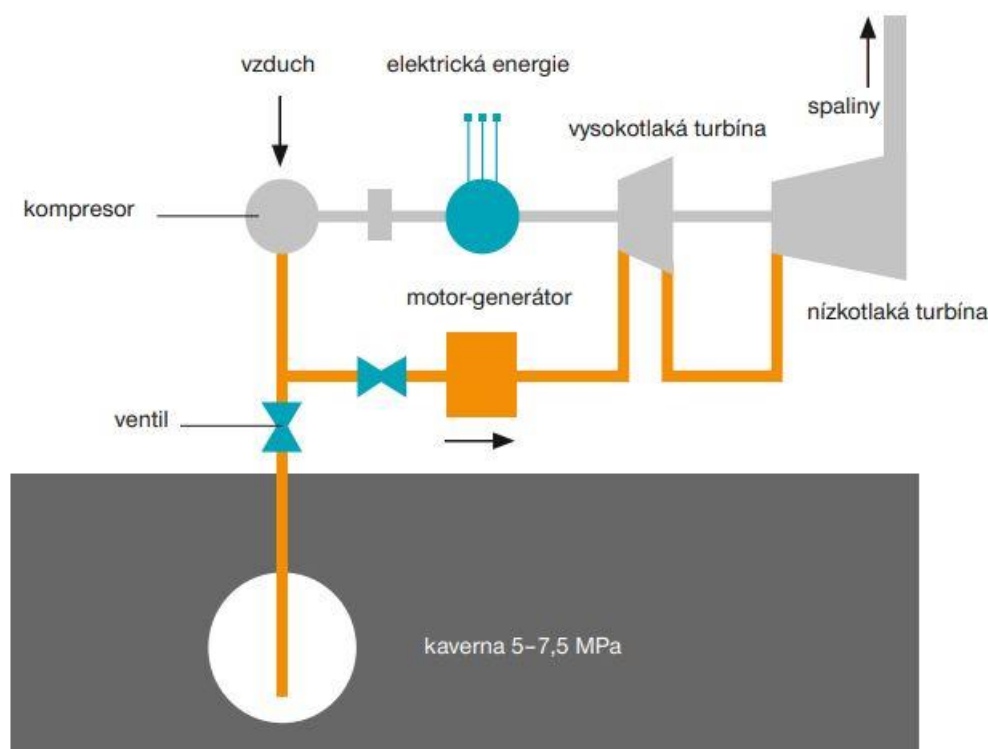
Termodynamické systémy využívají dynamiku plynů, která je získávána pomocí teplotní setrvačnosti nebo stačením plynu na minimální objem a jeho opětovnou expanzí.

2.2.1 Akumulace do stlačeného vzduchu

Tento druh akumulace je postaven na kompresi média do podzemního uložště, kde je uložena pro další použití. Kompresi média je prováděna při přebytku energie (hlavně v noci). Uložště musí být dokonale utěsněno, aby nedocházelo ke snižování tlaku v systému (zvyšuje ztráty). Médium je do uložště vháněno kompresory, které jej stlačí na 5 až 7,5 MPa. [3]

Při stlačování vzduchu vzniká teplo, které se buď vypustí zpět do atmosféry, čímž se ztratí přibližně třetina energie. Tato metoda má celkovou účinnost mezi 42 až 55 %. V případě, kdy do kaverny unikají plyny z půdních uložšť a je využíváno teplo vznikající při kompresi plynů, je zde možnost navýšení celkové účinnosti až na 70 %. [6]

Využívání této akumulace je výhodné zejména při přebytku elektrické energie. Životnost této akumulace je závislá jen na životnosti jednotlivých komponentů (podzemní uložště se neopotřebuje). Kapacita systémů je dána zejména velikostí úložných prostor, ale potenciál je zde velký díky výkonu až 5 kW na 1 m³. Systém je schopen dodávat energii po dobu několika hodin, což je jeho hlavní výhoda. Zároveň je nutné systém několik hodin tlakovat a připravovat na spuštění, proto není schopná reagovat na výkyvy vždy. [7]



Obr. 2-3 Princip funkce akumulace do stlačeného vzduchu [3] - převzato

2.2.2 Akumulace do roztavených solí

Akumulace do roztavených solí využívá efektivní rozložení zrcadel k tavené soli. Tyto soli mají velkou tepelnou setrvačnost. Velké množství zrcadel je nasměrováno do jednoho bodu na tzv. Solární věž, ve které je umístěna směs solí, která je složena zejména z dusičnanu draselného. Jeho bod rozpadu je 400 °C, proto se zde využívá teplot kolem 370 °C. Takto roztavená a nahřátá sůl je uložena do izolovaného kontejneru, kde čeká, až bude nedostatek energie. Při nedostatku energie je směs využita jako výměník tepla a z přivedené vody vytváří páru, která je zde dále spotřebována jako v každé jiné elektrárně. [8]

Tato metoda zatím u nás není moc využívána, zejména kvůli jejím velkým požadavkům na délku slunečního dne a rozměrům celého zařízení. Tyto systémy dosahují účinnosti až 70 %. [8]

2.3 Mechanické

Tento druh akumulace využívá mechanické přístroje na přeměnu různých druhů energie na elektrickou energii. Tyto systémy jsou většinou velmi prostorné a vyžadují často speciální geografické podmínky.

2.3.1 Setrvačníky

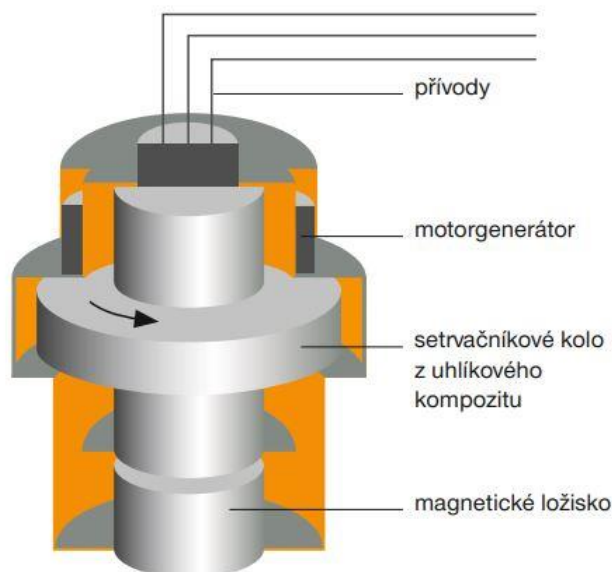
Setrvačníky neboli setrvačnickové akumulátory (Obr. 2-4) jsou historicky prvním akumulátorem energie. Dříve sloužily jako hrnčířská kola a pohony městské hromadné dopravy. Pro jejich ohromnou velikost se začaly zmenšovat a zlehčovat. Dnes je jejich kinetická energie

použita v elektromobilech a provozech, kde výpadek energie znamená ztrátu dat, popřípadě znehodnocení výrobků. [3]

Celý mechanismus je uschován ve vzduchotěsném obalu obsahující vakuum. V jeho vnitřku je uloženo setrvačnickové kolo, které se mění dle jeho využití. Pro vysokootáčkové setrvačnické kolo jsou pro konstrukci kol použita uhlíková vlákna a pro pomaloběžné naopak těžká ocelová kola. Setrvačnickové kolo je upevněno v ložisku s co nejmenším odporem. Volba ložiska značně ovlivňuje velikost ztrát celého systému, proto jsou často použita magnetická ložiska. Spolu se setrvačnickem se otáčí generátor, který generuje elektrickou energii. [7]

Tyto systémy jsou schopny dosahovat až milion otáček za minutu, ale pro reálná použití jsou používána desítky tisíc (pomaloběžné) a stovky tisíc (rychloběžné) otáček za minutu. [3] Výhodou setrvačnicků je dlouhá životnost a velké výkony (až desítky MW), kterých dosahují. Na druhou stranu jsou veliké, těžké (pro větší výkony) a jsou schopny dodávat energii poměrně krátkou dobu. Jejich účinnost se pohybuje mezi 60 až 80 % a reakční dobou v řádu desítek milisekund. [7]

U nás se na této technologii stále pracuje, příkladem může být setrvačnicková baterie, která byla představena v roce 2017 jako projekt v ekologické soutěži E.ON Energy Globe. Zde byla představena jako nechemická baterie. U tohoto projektu se dále uvažuje zejména pro využití u Plug-In hybridů. [5]



Setrvačnickový akumulátor s rotorem z uhlíkového kompozitu zavěšeným v magnetických ložiskách, otáčejícím se rychlostí 100 000 otáček za minutu

Obr. 2-4 Řez setrvačnickem [3] - převzato

2.3.2 Přecherčpávací vodní elektrárny (PVE)

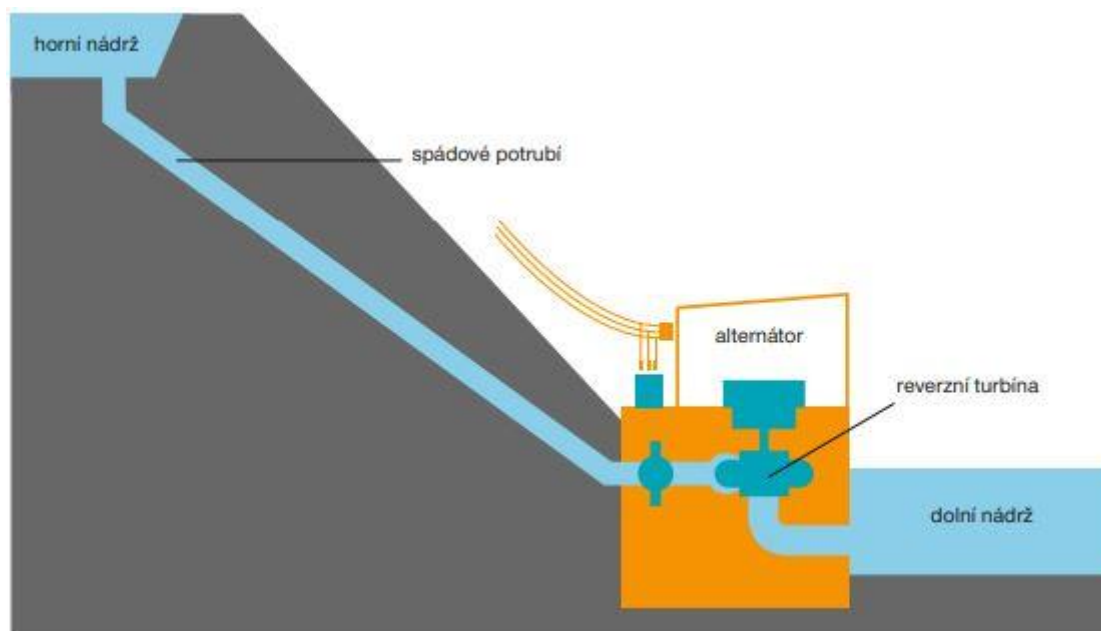
Přecherčpávací elektrárny (Obr. 2-5) jsou nejjednodušší systém akumulace elektrické energie. K akumulaci stačí dvě nádrže, velké potrubí a turbína. Vyžadují dostatečné množství vody, a to z přírodních nebo umělých nádrží.[3]

PVE se začaly využívat zejména kvůli jejich dlouhé a konstantní dodávce „levné“ elektrické energie při špičkovém provozu. Princip je jednoduchý. Při nedostatku elektrické energie je voda

pouštěna z horní nádrže do spodní. U spodní nádrže se nachází většinou reversní turbína (Francisova), která mění přivedenou kinetickou a potenciální energii vody na mechanickou (na hřídeli) a až poté pomocí motorgenerátoru (synchronní stroj) na elektrickou energii. Při přebytku elektrické energie (v noci) je pochod přesně opačný, motorgenerátor je přepnut do režimu motoru a pomocí turbíny je voda tlačena zpět do horní nádrže. [3]

Možné je i využití Peltonovy turbíny a čerpadel, kde turbína slouží pouze ke generaci energie a čerpadla k vhánění vody zpět do horní nádrže. [3]

PVE mohou přejít do provozu do několika málo vteřin, plný výkon jsou schopny dodávat již minutu po spuštění. U nás jsou využívány nejvíce Dlouhé Stráně a Dalešice. Jejich výkon dosahuje až 650 MW s dobou dodávky až několika hodin. Ve světě dosahují výkonu až 3000 MW (Virginia). Jejich využití je výhodné zejména při startu ze tmy a během špičky. Avšak tento systém není velmi vhodný při aktivní regulaci parametrů, zejména kvůli svojí reakční době a dlouhému několika hodinovému znovu přivedení do stavu produkování elektrické energie. [3] Celková účinnost PVE dosahuje 70 až 80 %. [9]



Obr. 2-5 Princip PVE [3] - převzato

2.4 Chemické

Tento druh akumulace spočívá v přeměně elektrické energie na médium, které je později využito jako zdroj energie. Tyto systémy pracují např. na principu elektrolýzy.

2.4.1 Akumulace do vodíku

Akumulace do vodíku je jedním z hlavních představitelů skupiny „Power to Gas“. Vodík je zde vyráběn pomocí elektrolýzy, která pod tlakem vyrábí z vody vodík. Ten je poté ukládán v tlakových nádobách, které jsou odolné proti jeho unikání. Tato metoda podporuje velmi dlouhou dobu skladování, které se následně dá využít při nedostatku elektrické energie. Při potřebě energie se vodík přemění na elektrickou energii v palivovém článku. [10]

K anodě článku je přiváděn vodík a na katodu je přiváděn kyslík. Zde vzniklé protony jsou vyvedeny ven, kde mohou konat svoji práci. [11]

Tato akumulace je hojně využívána ruku v ruce s obnovitelnými zdroji (solární, větrné elektrárny). Instalace se často provádí již na místě instalace zdrojů. Jejich elektrická energie je již na místě převáděna na vodíky a uschovávána pro další použití. [10]

Výkony těchto jednotek dosahují až stovky MW. Jejich účinnost se pohybuje mezi 25 až 45 %. Což je způsobeno zejména dvojitou přeměnou energie. Energii jsou schopny dodávat až po dobu několika týdnů, což závisí pouze na velikosti nádrží na vodík. [6]

2.5 Elektrochemické (Bateriové)

Podle principu se elektrochemické zdroje proudu dělí na primární, sekundární neboli akumulátory a palivové články. [13]

Primární

Primární články jsou články s omezeným počtem reaktantů. Vybitím článku se reaktanty spotřebují a nelze je znovu do článku navrátit ani jeho opětovným nabitím. Jedná se tedy o články na jedno použití, běžně označovány jako baterie. [13]

Sekundární

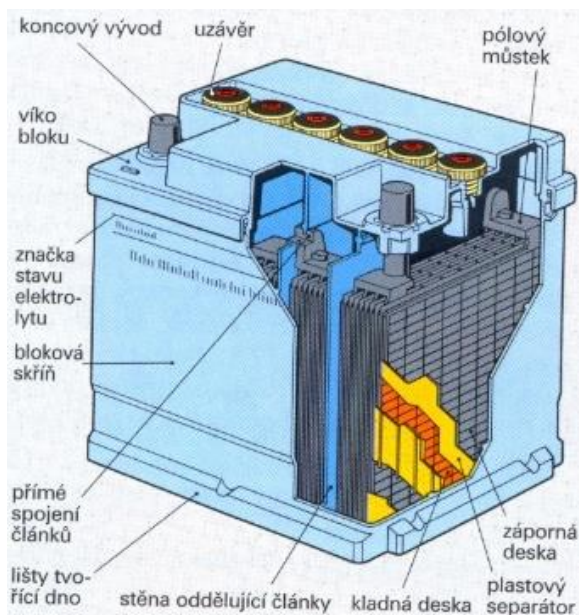
Sekundární články mají podobně jako primární pouze omezený počet reaktantů, ale lze je znovu nabitím převést do původního aktivního stavu. Jsou tedy určeny na větší počet cyklů. Tyto články jsou nazývány akumulátory. Do této skupiny spadají všechny dále zmiňované druhy baterií (baterie je spojení dvou a více článků dohromady). [13]

Palivové

Palivové články nesou svůj název kvůli tzv. studené spalovací reakci, při které vzniká elektrický proud. Ukázkou palivového článku je Chemická akumulace (viz 2.4). [13]

2.5.1 Olověné baterie

Olověné baterie patří k nejdéle vyráběným bateriím na světě. Z celosvětové produkce baterií představují více než 45% podíl. Jsou využívány zejména pro své široké spektrum aplikací. [14]



Obr. 2-6 Olověná baterie [21] - převzato

Konstrukce olověných akumulátorů (Obr. 2-6) se nachází uvnitř nádoby, která musí být odolná proti vlivům vnitřního prostředí (PPE, PP, AS, SAN, ABS). Hlavní částí akumulátoru jsou elektrody, které jsou zhotoveny jako olověné odlitky. Kladná elektroda je zhotovena mřížkou nebo žebrováním. Záporná elektroda mřížkou. Tyto elektrody bývají řazeny do sady, tak aby byla zvětšena jejich kapacita. [13]

Pro elektrické oddělení kladné a záporné elektrody je použit separátor, který má za účel klást minimální elektrický odpor, umožňovat průchod iontů a zabránit průchodu molekul kovů. Separátory jsou papírové, mikroporézní a ze skleněných vláken. [13]

Jako elektrolyt je používána kyselina sírová H_2SO_4 o hustotě 1,24 až 1,28 g/cm³. Elektrolyt je při vybíjení méně koncentrovaný, jelikož zde vzniká voda. Vodu v bateriích je důležité kontrolovat. Při nabíjení je tomu přesně obráceně. [13] Pomocí tohoto děje lze měřit úroveň nabití/vybití baterie. [14] Životnost se pohybuje mezi 5 až 12 lety. [13]

Dalším druhem elektrolytu je AGM (absorbed glass mat). Jeho hustota se pohybuje mezi 1,27 a 1,29 g/cm³. Zde vznikající vodík rekombinuje s kyslíkem zpět na vodu. Výhodou akumulátorů s AGM je jejich menší vnitřní odpor, tudíž větší nabíjecí proudy. Nevyžadují údržbu a jejich životnost je 5 až 12 let. [13]

Novější akumulátory využívají gelové elektrolyty, které jsou ztužené tixotropním gelem SiO_2 . Výhody jsou zde stejné jako u AGM. Jejich životnost je prodloužena na 15 až 18 let. [13]

Dnes nejnovější olověné baterie často využívají gelového (bezúdržbového) elektrolytu, olověná elektroda se nahrazuje uhlíkovými vlákny, která značně sníží celkovou hmotnost baterie. Další výhodou jsou větší nabíjecí proudy a delší životnost (500 až 1200 cyklů). [15]

2.5.2 Lithiové baterie

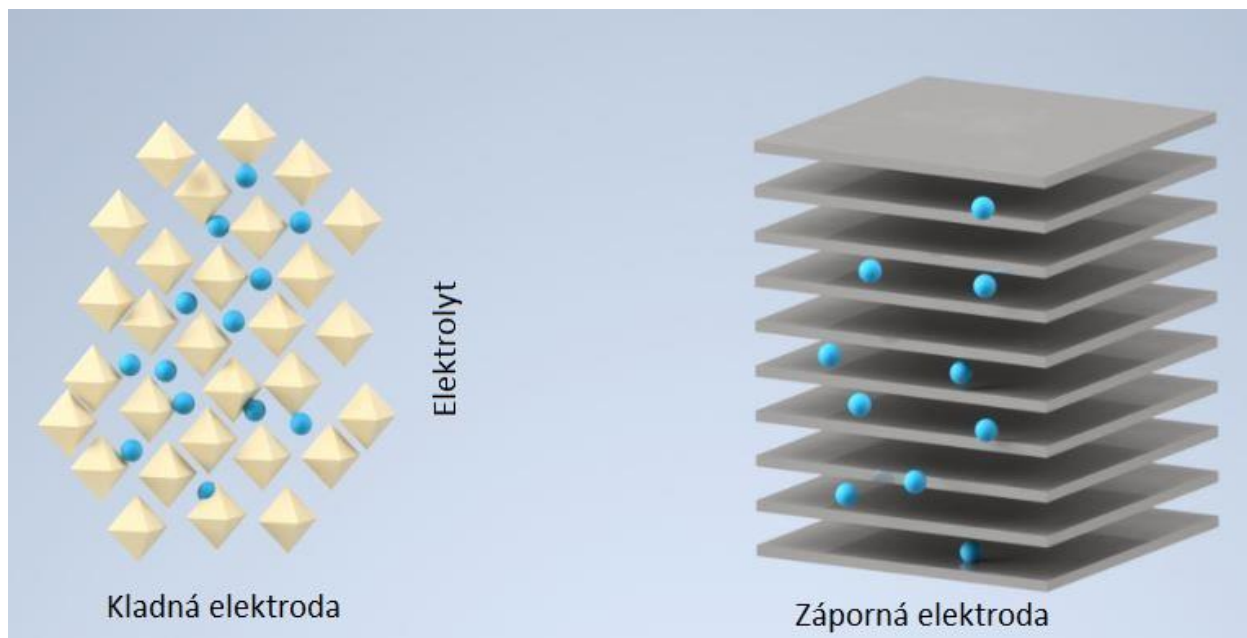
Lithiové baterie jsou dnes velice žádanou komoditou v celém spektru technického průmyslu. Jejich popularita (od 90. let 20. století) rapidně vzrostla s použitím této technologie v mobilních telefonech. Poté se dále rozšiřovala do všech odvětví průmyslu. [7]

Konstrukce lithiových článků (viz Obr. 2-7) je podobná jako u olověných, jen s rozdílným použitím materiálů. Kolektor anody bývá z měděné fólie (tloušťka 18 μm) a katoda z fólie hliníkové (tloušťka 25 μm). [13] Anoda jako taková je tvořena uhlíkem a katoda je tvořena oxidy kovů. [7]

Elektrody jsou vyráběny z tzv. interkalačních sloučenin, které musí zajistit přijímání a zpětné navrácení nejen molekul, ale také celých atomů do své krystalické struktury. Celková tloušťka elektrody se pohybuje okolo 200 μm. [13] Články Li-ion (Lithium ion) neobsahují lithium v podobě kovu, ale pouze jako ionty, proto Li-ion. Katoda bývá tvořena těmito sloučeninami: LiCoO_2 (LCO), LiMn_2O_4 (LMO), LiNiMnCoO_2 (NMC), LiFePO_4 (LFP), LiNiCoAlO_2 (NCA), Li_2TiO_3 (LTO) [16]

Jako separátor je často využívána porézní fólie z polypropylenu či polyetyleny. [13] Elektrolyt je tvořen organickými rozpouštědly smíchanými se soli lithia. Konstrukce se u každého druhu akumulátoru může mírně lišit na základě použitých materiálů, bude-li tomu tak, bude to zmíněno u konkrétních poddruhů. [7]

Akumulátory zkonstruované z těchto článků jsou celkově lehčí než akumulátory olověné. Z pohledu údržby nezáleží na konstrukci baterie, protože jsou všechny bezúdržbové. Což bereme za velké plus oproti olověným článkům. Další velkou výhodou je velmi malé procento samovybíjení článků. Hlavní nevýhodou lithiových článků je jejich vyšší pořizovací cena. [7]



Obr. 2-7 Konstrukce Li-ion baterií [22] – převzato a upraveno

Lithium kobalt – LiCoO_2 (LCO)

Baterie LCO dle [19].

Díky poměrně velké měrné energetické hustotě je LCO velmi oblíbená u elektroniky jako jsou např. mobilní telefony, notebooky nebo digitální kamery.

Katoda je zde tvořena oxidem kobaltu a uhlíkovou anodou. Během vybíjení se pohybují ionty od anody ke katodě. Počet cyklů je zde omezen právě kobaltem, který je v novějších bateriích míchán, nebo nahrazován niklem, manganem nebo hliníkem.

Další charakteristická vlastnost této baterie je C parametr, který je pro nabíjení menší, než pro vybíjení. LCO je schopna nabíjet 0,8 C, aniž by se tím zmenšovala její životnost, naopak vybíjet je schopna 1 C. Po překročení těchto hodnot hrozí přehřátí, které vede ke snižování životnosti, ta se zde pohybuje okolo 1000 cyklů.

Baterie LCO jsou kvůli vysoké ceně kobaltu nahrazovány bateriemi NMC a NCA, které mají cenu díky příměsím o něco nižší.

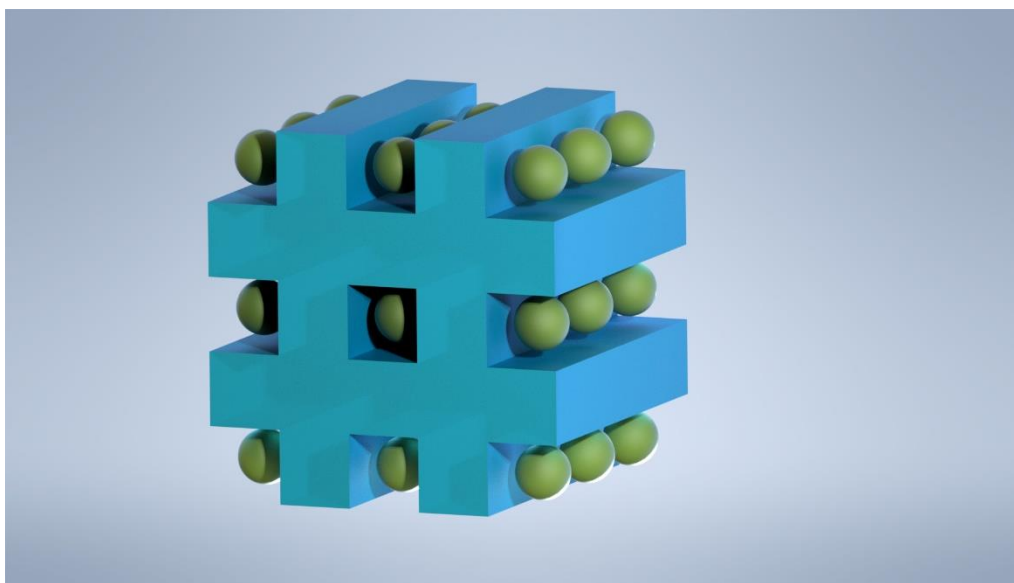
Lithium mangan – LiMn_2O_4 (LMO)

Baterie LMO dle [19].

Katoda z oxidu manganičitého je díky svému uspořádání (Obr. 2-8) schopna lépe využívat protékající ionty (vyšší proudy), avšak na úkor snížené měrné energetické hustotě. Proto je baterie schopna dodávat pulzně až 50 A, přičemž musíme dávat pozor, aby teplota nepřekročila 80 °C.

Typické využití těchto baterií je v elektromobilech (Nissan Leaf, BMW i3), kde zaujímají cca 30 % celkových baterií a slouží hlavně k okamžitému zrychlení díky vysokým proudovým špičkám.

Životnost LMO baterií se pohybuje okolo 700 cyklů, avšak tato životnost je často navyšována pomocí přidání malého množství silikonu na anodu.



Obr. 2-8 Struktura LMO [19] – převzato a upraveno

Lithium-nikl mangan – LiNiMnCoO₂ (NMC)

Baterie NMC dle [19].

Kombinace manganu a kobaltu spojuje výhody LCO a LMO baterií dohromady, díky kobaltu má baterie vyšší měrnou energetickou hustotu a díky manganu je schopna dodávat vyšší hodnoty proudu (až 20 A).

Typické využití těchto baterií nalezneme v akumulátorovém nářadí, elektrokolech, elektrických automobilech a dalších elektricky poháněných prostředcích.

Kombinace kobaltu, manganu a niklu je cenově i z hlediska vlastností velmi výhodná. S její poměrně vyšší životností, která se pohybuje v rozmezí 1000 až 2000 cyklů je velmi oblíbená zejména v odvětví mobility.

Lithium-železo fosfor – LiFePO₄ (LFP)

Baterie LFP dle [19].

Použitím fosfátu na výrobu katody baterie získává velmi malou rezistivitu, která vyzdvihne přednost těchto baterií. Tato přednost je specifická zejména velkou teplotou, která může dosahovat až 270 °C a proudovými špičkami až 40 A, které mohou být dodávány až po dobu 2 s.

Navzdory velmi velkým proudům je baterie schopna dosahovat životnosti přes 2000 cyklů. Proto je hojně využívána tam, kde je potřeba velmi dlouhá životnost a vysoké proudové nároky. Například může nahrazovat klasickou olověnou autobaterii, která dodává velký proud při startování.

Tato baterie je spolu s LTO označována za nejbezpečnější ze skupiny lithiových baterií.

Lithium nikl kobalt hliník – LiNiCoAlO₂ (NCA)

Baterie NCA dle [19].

Baterie NCA jsou téměř totožné s bateriemi NMC. Oproti NMC mají vyšší měrnou energetickou hustotu, nižší maximální provozní teplotu (pouze 150 °C) a mnohem menší počet cyklů a to kolem 500.

Tato baterie byla využívána pro některé specifické aplikace, ale postupně je nahrazována NMC.

Lithium-titan – Li₂TiO₃ (LTO)

Baterie LTO dle [19].

U těchto baterií je klasická uhlíková anoda nahrazena titanem. Katoda je stejná jako u NMC článků. Uspořádání (viz Obr. 2-8) je stejné jako u článků LMO. Tato konstrukce zde také vede ke snížení měrné energetické hustoty, která je zde z dosud uvedených lithiových baterií nejnižší.

C parametr nabíjení je zde velmi odlišný od ostatních Li-ion baterií a to tím, že dosahuje až hodnoty 5 C. Tato hodnota je velmi odlišná, protože ostatní Li-ion baterie dosahují hodnoty pouze 1 C (za předpokladu, že nezkracujeme životnost baterie). Vybíjení dosahuje ve špičce až 10 C, při pulzních aplikacích krátkodobě až 30 C.

Tyto baterie dosahují životnosti až 10 000 cyklů. Proto jsou baterie využívány jako záložní zdroje energie. Dále mají své využití v elektrických automobilech.

Nevýhodou těchto baterií je velmi vysoká cena, která se pohybuje kolem 1000 \$/kWh.

2.5.3 Průtokové baterie

Průtokové baterie také označované jako regenerativní jsou oproti již dříve zmíněných olověných a lithiových baterií odlišné zejména ve způsobu ukládání elektrického náboje. Tento druh baterií byl poprvé použit již v roce 1884 Charlesem Renardem. Tato technologie nebyla v této době nijak převratná, proto byla v ústraní až do 70. let 20. století. [17]

Hlavní konstrukční rozdíl, jak můžeme vidět na Obr. 2-9 je od předchozích baterií v elektrolytu. Elektrolyt je uložen v nádobách, ze kterých je vháněn pomocí čerpadel do prostoru mezi elektrodami. Zde je proces nabíjení a vybíjení stejný jako u konvenčních baterií. Prostor elektrod je z poloviny tvořen elektrodami a prostorem pro elektrolyt. Tento prostor je oddělen membránou, která zabraňuje promíchání elektrolytu, ale dovoluje průchod iontů. [17]

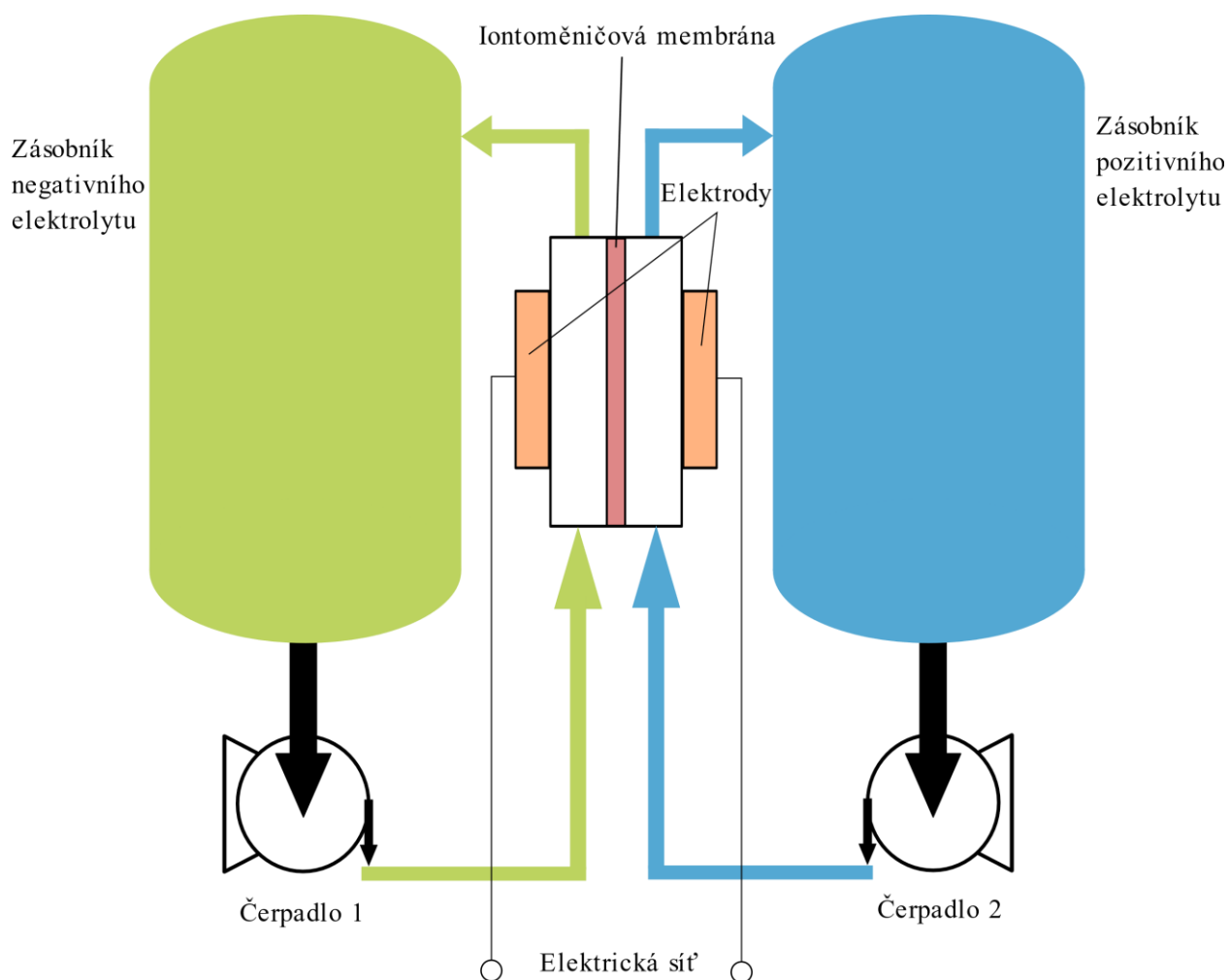
Nyní jsou dle [18] známy tyto druhy redoxních akumulátorů:

- polysulfidová brómová baterie
- železo-chromité baterie
- železo-chlorité baterie
- zinko-cériové baterie
- halogenové baterie Br – ZnBr
- vanadové baterie (VRB)

Hlavní předností a odlišností těchto baterií je téměř nekonečný cyklus nabití a vybití. Přičemž samovybití je zde zcela zanedbatelné, proto je možné držet baterie téměř stále v nabitěm stavu. Systémy jsou tedy velmi vhodné pro obnovitelné zdroje jako je např. fotovoltaika nebo větrné elektrárny, kde je výkon velmi nestálý a není nepřetržitý. [18]

Životnost těchto systémů je dána především životností membrány, která je přibližně 15 let a životností čerpadel, která slouží k vhánění elektrolytu z nádob do prostoru mezi elektrodami. Jejich životnost je odhadována mezi 5 až 7 lety dle vytížení těchto akumulátorů. [18]

Požadavky na prostor jsou zde odlišné od předchozích druhů, a to zejména tím, že elektrolyt může být zcela na odlišném místě než články a řídicí jednotka. Prostorově rozměrnější jsou nádoby na elektrolyt, které představují cca 90 % celkového zabraného prostoru. Ten je ovšem dán především kapacitou jednotlivých systémů, která se pohybuje od jednotek kW až do řádů MW. [18]



Obr. 2-9 Průtočná baterie [26] – převzato a upraveno

U nás se touto technologií zabývá např. firma Pinflow energy storage. Tato společnost má již zvládnuté systémy o výkonech až 6 kW (Obr. 2-10). Nyní se zaměřuje na prezentaci této technologie pomocí systému, který bude disponovat výkonem až 20 kW a kapacitou až 100 kWh. [25]



Obr. 2-10 Aktuálně vytvářený systém o výkonu 5-15 kW a kapacitě 50 kWh. [25] - převzato

Porovnání akumulátorů

Z předchozí kapitoly lze porovnat baterie:

Tabulka 1 Porovnání lithiových akumulátorů [19]

Název	Lithium kobalt	Lithium mangan	Lithium-nikl mangan	Lithium-železo fosfor	Lithium nikl kobalt hliník	Lithium-titan
Zkratka	LCO	LMO	NMC	LFP	NCA	LTO
Nominální napětí (V)	3,6	3,7	3,6	3,2	3,6	2,4
Plně nabitý článek (V)	4,2	4,2	4,2	3,65	4,2	2,85
Plně vybitý článek (V)	3	3	3	2,5	3	1,8
Měrná energetická hustota (Wh/kg)	150-200	100-150	150-220	90-120	200-260	70-80
C parametr nabíjení	0,7-1	0,7-1	0,7-1	1	1	1 (max 5)
C parametr vybíjení	1	1 až 10	1 až 2	1 (25 pulzně)	1	10
Maximální provozní teplota (°C)	150	250	210	270	150	-
Životnost (cyklů)	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	500	3000-10000
Cena (\$/kWh)	-	-	420	580	350	1005

Tabulka 2 Porovnání akumulátorů [20]

	Olověné	Li-ion	VRB
Měrná energetická hustota (Wh/kg)	30–50	75–260	15–75
Energetická hustota (Wh/l)	50–80	200–600	15–33
Měrný výkon (W/Kg)	75–300	100–500	50–150
Účinnost (%)	70–92	85–90	65–85
Životnost (let)	5 až 15 (~10)	5 až 15	10 až 20
Životnost (cyklů)	500 - 1.200	1000 - 10.000	15.000 +

3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY PRO VYUŽITÍ AKUMULACE V DS

Okrajové podmínky pro využití akumulace elektrické energie jsou zde vztaženy k podpůrným službám. Tyto služby jsou poskytovány, aby v síti nenastaly nežádoucí stavy (např. rozpad sítě, nesouměrné zatížení sítě).

3.1 Podpůrné služby (PPS)

Podpůrné služby jsou poskytovány jednotlivými účastníky na trhu s elektrickou energií a společně tak zajišťují tzv. systémové služby. [23]

Všechny podpůrné služby musí dle [23] splňovat požadavky jako:

- Měřitelnost – s předem stanovenými požadavky a parametry
- Garantovaná dostupnost služby
- Certifikovatelnost – stanovený způsob prokázání poskytování služeb
- Možnost průběžné kontroly poskytování

Dále můžeme podpůrné služby rozdělit dle [23] do dvou skupin:

- Služby výkonové rovnováhy (3.2): FCP, ${}_A$ FRP, ${}_M$ FRP_T, RRP
- Ostatní podpůrné služby (3.3): SRUQ, OP, BS

Krom těchto druhů PPS je u nás využívána i možnost výpomoci ze zahraničí.

Certifikace a pravidla kvalifikace

Tato pravidla vychází z [24]:

Všechny subjekty poskytující jakoukoliv z výše uvedených služeb jsou povinny vlastnit certifikaci a musí splňovat minimální požadavky stanovené správcem. Certifikace je proces, při kterém na základě podání žádosti žadatelem je provedeno měření. Na základě měření musí být vypracován protokol, který rozhodne, zda je provozovna schopna poskytovat PPS, o které požádala.

Každá z PPS má jasně daný postup, kterým musí být měření provedeno. Tato měření musí být prováděna v předem daný čas a to tak, aby nijak neomezila okolní odběratele.

3.1.1 Subjekty poskytující podpůrné služby v rámci DS

Dle [24] jsou subjekty rozděleny na:

Výrobní blok

Výrobní blok je výrobní jednotka, která plní podpůrné služby a je vlastněna jedním právním subjektem.

Fiktivní výrobní

Fiktivní výrobní může být tvořena větším počtem výroben. Toto se často využívá u elektráren, kde je celá produkce připojena na stejnou napěťovou hladinu.

3.2 Služby výkonové rovnováhy (SVR)

Zálohy sloužící k SVR dle [23] musí být pro každou kategorii provozovány nezávisle na ostatních zálohách. Zálohy spadají většinou pod správu ČEPS a jsou následující:

3.2.1 Proces automatické regulace frekvence (FCP)

Tento proces spočívá v přesně dané změně výkonu v závislosti na odchylce frekvence od běžné hodnoty. Změna výkonu je realizována pomocí korektoru frekvence, a to v závislosti na výchylce frekvence. Tento vztah lze vyjádřit pomocí regulační rovnice:

$$\Delta P = -\frac{100}{S} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f \quad (3.1)$$

Kde:

ΔP	požadovaná změna výkonu jednotky	(MW)
S	statika	(%)
P_n	nominální výkon jednotky	(MW)
f_n	zadaná frekvence	(obvykle jmenovitá 50 Hz)
Δf	odchylka frekvence od zadané hodnoty	(Hz)

Maximální výkon, který je pro FCP uchovávan, je uvolňován již při změně kmitočtu o 200 mHz. Záloha FCP musí být schopna dodat pro automatickou regulaci 100 % výkonu do 30 sekund od vychýlení frekvence od požadované hodnoty, ale zároveň musí být schopna dodat 50 % výkonu do 15 sekund od výchylky.

Za účelem omezení výpadků těchto záloh PPS je stanovena maximální hodnota jedné jednotky na 10 MW a minimální hodnota na 3 MW.

3.2.2 Automaticky ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy (AFRP)

AFRP je automatický proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy prováděný pomocí změny hodnoty výkonu. Záložní jednotka využívá regulátoru frekvence a salda předávaných výkonů. Za zálohu je považována kladná, ale i záporná změna výkonů na výstupních svorkách záložní jednotky.

Stejně jako u FCP je zde dána rychlost a velikost odezvy na změny v síti. Tato velikost je buď kladná, nebo záporná a musí být realizována nejpozději do 10 minut od vznesení požadavku dispečerem.

Rychlost změny výkonu je stanovena minimem na 2 MW/min. S minimálním požadavkem na velikost regulační jednotky $A_{FRP} + a_{AFRP}$ na 10 MW, naopak maximální výkon na regulační jednotku je stanoven na 70 MW.

3.2.3 Ručně ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy ($MFRP_t$)

$MFRP_t$ je ručně ovládaný proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy prováděný pomocí změny hodnoty výkonu. Regulační záloha ($MFRP_t +$ nebo $MFRP_t -$) musí být poskytnuta do t minut od vydání příkazu dispečera.

Proces $MFRP_t$ může být provozován ve variantě $t = 5$ minut, nebo ve variantě $t = 15$ minut.

Velikost regulačních záloh je závislá na minimální reakční době, pro $t = 5$ minut je maximální hodnota pro jednotku 30 MW. Tuto hodnotu určuje ČEPS. Pro reakční dobu $t = 5$ minut musí být schopny regulační zálohy plně fungovat po dobu minimálně 4 hodin od spuštění.

Pro $t = 15$ minut je velikost jednotky stanovena maximálně na 10 MW, avšak celá záloha může dosahovat výkonu až 70 MW. U systému, kde $t = 15$ minut, není doba aktivace služby nijak časově omezena.

3.2.4 Proces náhrady záloh RRP

RRP je proces náhrady záloh, který je realizovatelný pomocí $RR +$ nebo $RR -$ jednotkou. Tato jednotka musí být schopna reagovat na příkaz dispečinku do 30 minut od vznesení požadavku. Touto zálohou měníme kladný nebo záporný výkon na svorkách poskytujícího zařízení.

Služba RRP může být aktivována na celistvé násobky 15, to znamená, že služba může být aktivována minimálně na 15 minut, ale maximálně na 60 minut.

Velikost regulační jednotky je stanovena minimálně na 10 MW, přičemž celý regulační systém může dosahovat výkonu až 70 MW.

3.3 Ostatní podpůrné služby

K řízení DS jsou dle [24] využívány podpůrné služby, které jsou provozovány paralelně s DS. Pro zajištění správného provozu DS jsou využívány tyto regulace:

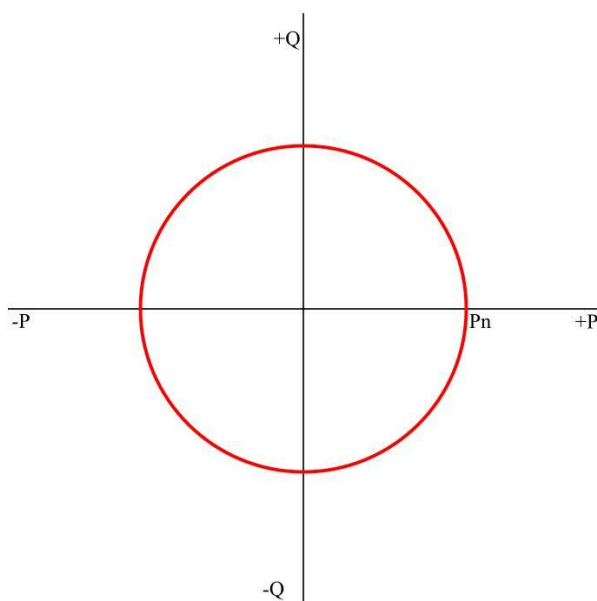
3.3.1 Sekundární regulace U/Q (SRUQ)

Sekundární regulace U/Q je automatická funkce, která slouží k regulaci rozsahu napětí v DS a přetoků jalové energie v této síti. Tento proces musí být aperiodický a dlouhý maximálně 60 vteřin. Zároveň systém musí spolupracovat se systémy terciální regulace napětí a jalového výkonu. Celý rozsah regulace je vidět na Obr. 3-1. [24]

Na hladině VN a VVN je tato služba využívána přímo ve výrobě, popřípadě na její přípojnicích. [24]

Při této podpůrné službě je nutné dle [24] respektovat tato omezení:

- Nejvyšší dovolený proud, napětí a zdánlivý výkon stroje.
- Nejvyšší dovolené napětí vlastní spotřeby, proud rotoru
- Nejnižší dovolené napětí stroje, vlastní spotřeby
- P-Q diagram stroje
- Vlastnosti a charakteristiky zdroje



Obr. 3-1 U/Q příklad regulační oblasti [31] - převzato

3.3.2 Schopnost ostrovního provozu (OP)

Celá problematika OP je dle [24].

Jedná se o schopnost provozu výroby do určité části sítě (ostrova).

Ostrovní provoz výroby se vyznačuje zejména změnami systémových veličin (frekvence, napětí), tento provoz pracuje do izolované části sítě. Výrobní přecházejí do ostrovního režimu automaticky zejména při změně frekvence o 0,2 Hz (49,8 Hz a 50,2 Hz). Tento provoz se vyznačuje zejména jeho regulací, která musí být flexibilní v celém rozsahu možného zatížení. Regulace musí být v celém rozsahu řešena pouze prostředky provozovny (na rozdíl od běžného provozu, kdy jsou dostupné systémové služby).

Návrh a rozsah ostrovního provozu je předem stanoven PDS. Hlavním parametrem je výkon, ochrany a automatiky pro schopnost např. nafázování na síť.

Provozovatel provozu s možností OP je povinen provádět školení pro obsluhu jednotlivých pracovišť. Dále je povinen zajistit zálohované telekomunikační spojení mezi obsluhou a PDS. Dále musí dodržet předem stanovené časové a výkonové limity pro minimální a maximální zatížení zdroje, které bere v potaz jeho tepelnou charakteristiku.

Přechod do ostrovního režimu

Přechod do ostrovního režimu je většinou způsoben náhlou změnou frekvence, ale v některých případech tomu může předcházet i nerovnováha činného a jalového výkonu. Při přechodu do ostrovního režimu je nutné okamžitě zajistit:

- změnu režimu regulace výroby (celý ostrov musí být schopna regulovat pouze výroba) a přizpůsobení regulace novému kmitočtu;
- odpojení dálkové regulace výkonu (sekundární i terciální);

- plynulý přechod otáček a výkonu na novou hodnotu požadovanou frekvencí ostrovního režimu;
- odepnutí výrobní od vnější sítě za plynulého provozu na vlastní spotřebu, nebo na předem danou část DS;
- nastavení regulací zdroje na hodnotu vhodnou pro práci v ostrovním režimu.

Všechny již zmíněné přechody a činnosti musí probíhat plynule a stabilně.

Ostrovní provoz

Výrobní musí zajistit stabilní paralelní koordinaci s ostatními výrobny v ostrovním režimu. Výrobní musí mít adekvátní (realizovatelnou) odezvu na regulaci a dodávku činného a jalového výkonu při změně frekvence v síti. Podle pokynů dispečera DS musí plynule regulovat otáčky a výkon výrobní. Během celého provozování musí provozovna splňovat frekvenční limity viz Tabulka 3.

Tabulka 3 Frekvenční limity pro ostrovní provoz [30] - převzato

Rozsah frekvence	Doba provozu
47,5 Hz – 48,5 Hz	30 minut
48,5 Hz – 49,0 Hz	90 minut
49,0 Hz – 51,0 Hz	Neomezená
51,0 Hz – 51,5 Hz	30 minut

Opětné připojení ostrova k síti

Výrobní musí být schopna pracovat v ostrovním režimu minimálně po dobu 2 hodin. Musí regulovat napětí a frekvenci přesně dle požadavků DS, aby byla schopna správně přifázovat okolní síť.

3.3.3 Schopnost startu ze tmy (BS)

Celá problematika BS je dle [24].

Schopnost startu ze tmy je schopnost najet na jmenovité otáčky, dosáhnout jmenovitého napětí požadované napěťové hladiny, připojit soustavu k síti a zvládnout ji napájet v ostrovním režimu. Těchto požadavků musí být systém schopen dosáhnout bez pomoci vnějšího zdroje napájení.

Tato schopnost je nezbytná pro obnovení dodávky elektrické energie po částečném, nebo úplném rozpadu sítě.

Výrobní pro schopnost startu ze tmy jsou vybírány poskytovatelem PDS. Tyto výrobní musí disponovat záložním napájením telekomunikačního zařízení, dále musí zajišťovat pravidelné školení pro obsluhu výrobní pro jednotlivé činnosti.

Dodržení postupu

Každá výrobní, která disponuje BS je povinna dodržovat postup:

- po výpadku okamžitě zahájit náběh bez vnějšího zdroje napětí;

- zajistit předem smluvené parametry (velikost napětí, kmitočet a stabilitu) v předávacím bodě výroby a DS;
- dále provozovat výrobu v regulačním provozu ostrovní sítě.

Všechny tyto postupy a požadavky musí být splněny dle předem daných smluv a dohod. Nutnost dodržení tohoto časového rozvrhu je závislá na výsledné kvalitě a kompatibilitě s ostatními provozovny, které také mají BS.

Dostupnost a schopnost této služby je pravidelně kontrolována a testována zkouškou najetí ze tmy pro zacvičení provozního personálu, ale jen za předpokladu, že tato zkouška minimálně ovlivní provoz zdroje.

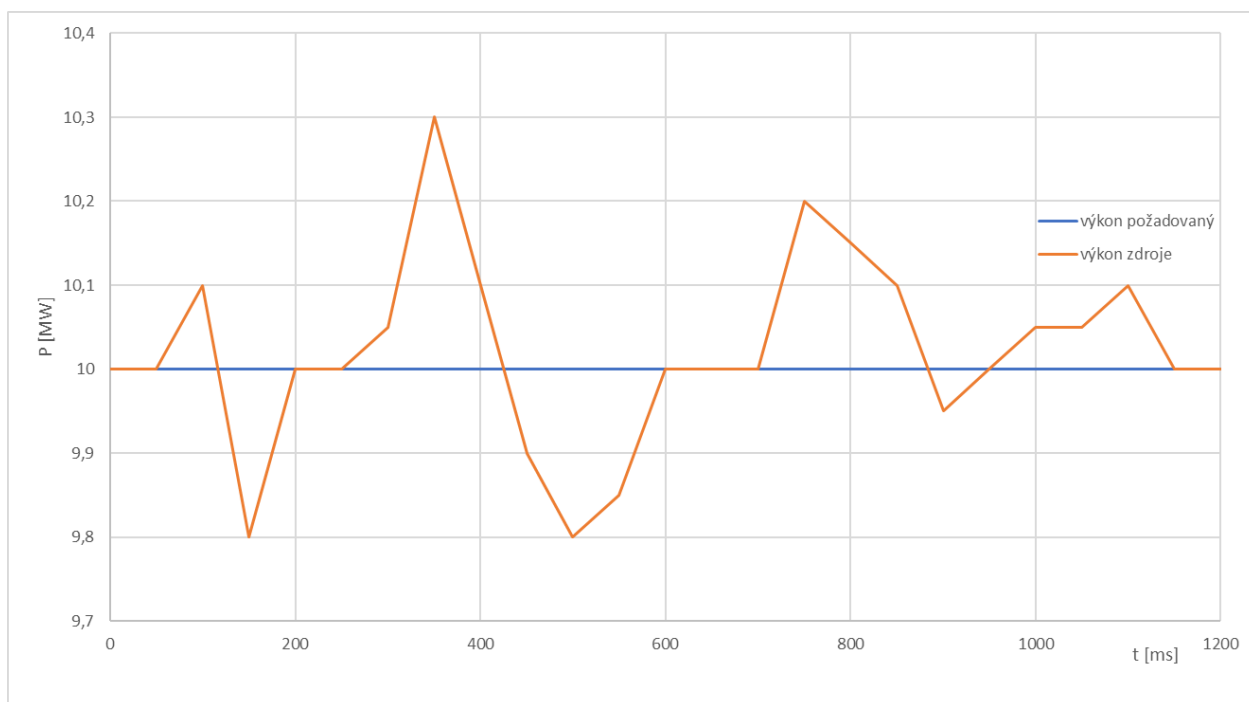
3.4 Peak-shaving (pokrývání výkonových špiček)

Problematika Peak-shavingu zpracována z [29].

Na problematiku Peak-shavingu můžeme nahlížet ze dvou stran:

1 Snížení požadavku na velikost rezervovaného příkonu a kapacity odběratele

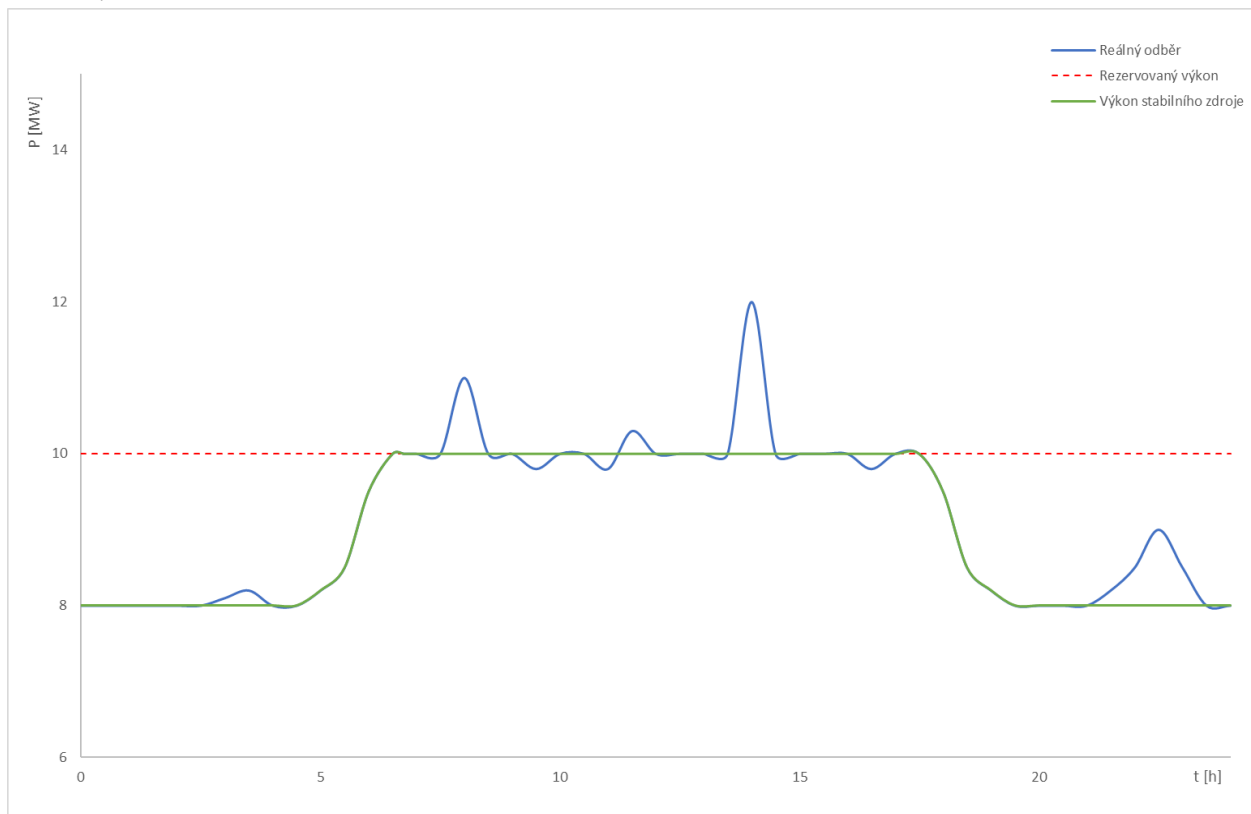
Peak-shaving neboli pokrývání výkonových špiček je služba, která není nijak definována v PPDS. Peak-shaving můžeme využívat k vyrovnávání spotřeby a výroby, kdy jsou požadavky na zdroj velmi rychlé. Baterie je zde stále nabíjena a vybíjena dle aktuálních požadavků viz Obr. 3-2.



Obr. 3-2 Peak-shaving

Dále tato služba může chránit odběratele před překročením hodnoty rezervovaného příkonu nebo kapacity. Možnost snížení rezervovaného výkonu a kapacity dovoluje v některých příkladech velmi ušetřit za zálohy, které jsou přesně dány na měsíc, popřípadě i na rok dopředu (viz Tabulka 4).

Na Obr. 3-3 můžeme vidět příklad využití, kdy výkon bez většího zatížení činí 8 MW a 10 MW při provozu. V tomto případě je aplikována baterie, která dokáže zajistit pokrytí výkyvů výkonu odběru.



Obr. 3-3 Denní odběrový diagram (snížení rezervovaného příkonu)

Příklad cen za rezervovanou kapacitu je uvedena v Tabulka 4. Tato cena je každoročně stanovena ERÚ a pro rok 2020 je následující:

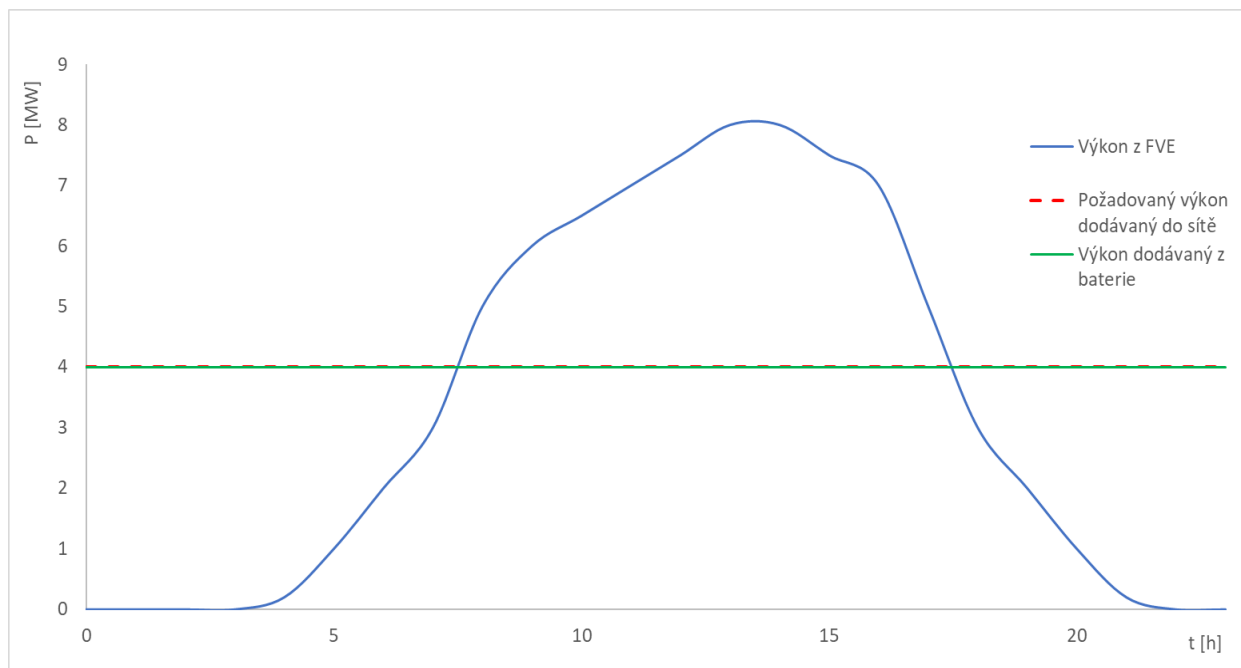
Tabulka 4 Ceny za rezervovanou kapacitu [28] – převzato a upraveno

Provozovatel distribuční soustavy	Hladina napětí	Měsíční cena za roční rezervovanou kapacitu v Kč/MW a měsíc	Měsíční cena za měsíční rezervovanou kapacitu v Kč/MW a měsíc
ČEZ Distribuce, a.s.	VVN	73 069	81 691
	VN	177 031	197 921
E.ON Distribuce, a.s.	VVN	68 239	76 722
	VN	158 233	177 903
PREdistribuce, a.s.	VVN	73 846	81 413
	VN	190 360	209 867

2 Stabilní dodávka elektrické energie z obnovitelných zdrojů (FVE a VE)

Tuto službu lze použít i u FVE a VE, kde dochází k nestabilní dodávce výkonu. Příklad takové dodávky můžeme vidět na Obr. 3-4. Výkon, který je generován FVE a přesahuje výkon

požadovaný, je ukládán do baterií. V okamžiku, kdy výkon dodávaný FVE klesne pod požadovanou hodnotu, začne baterie dodávat uložený výkon.



Obr. 3-4 Průběh denního výkonu na FVE (peak-shaving)

3.5 Mikrovýpadky

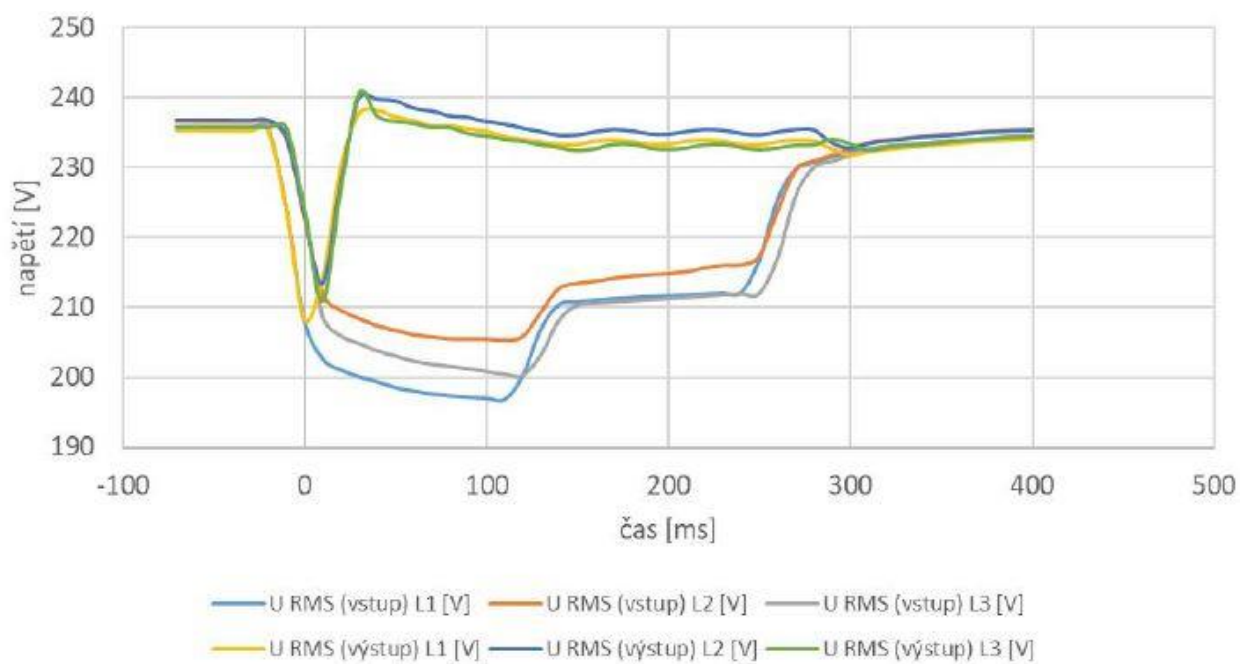
Celé téma mikrovýpadků je vypracováno z [27].

Mikrovýpadek je děj, který může vzniknout při poruše na nadřazeném vedení (zejména při zkratu), které je vyhodnoceno jako poruchové. Výpadek může trvat po dobu od 100 ms až do přibližně 500 ms, dokud nezasáhne OZ a další ochrany. Hloubka poklesu napětí je velmi závislá na konfiguraci sítě a vzdálenosti od místa poruchy. Tato porucha je velmi nepříjemná zejména pro technologie, které jsou závislé na stabilní dodávce, jako jsou například: řídicí počítače, procesy výroby nanotechnologií nebo lisovny.

Těmto výpadkům se dá velmi dobře zabránit instalací již zmíněných superkapacitorů (viz kapitola 2.1.1). Dalším možným řešením je instalace bateriového systému do prostor DS. Avšak při instalaci bateriového systému je velmi důležité brát ohled na jeho reakční dobu, která se pohybuje mezi 50 až 500 ms (velmi záleží na použitých komponentech celého systému). Systémy s touto reakční dobou nejsou schopny plně zajistit, aby nedošlo k poklesu napětí v místě odběru. Z tohoto důvodu je nutné počítat s citlivostí spotřebičů na rychlost a hloubku poklesu napětí, zda je systém vůbec schopen zamezit výpadku tohoto spotřebiče, či naopak spotřebič pokles nezaznamená a nijak to jeho funkci nenaruší (velké stroje s velkou setrvačností). Po odeznění poruchy a obnovení napětí pomocí OZ je nutné počítat s možným přepětím, které bude přetrvávat po celou reakční dobu systému.

Jak je patrné z Obr. 3-5 kapacitorové systémy mohou reagovat na pokles napětí velmi rychle. Již za 21 ms jsou schopny vrátit systém na požadovanou hodnotu napětí. V případě krátkodobých poruch dojde po OZ k obnovení původního stavu do doby 300 ms (v závislosti na nastavení OZ). Např. systém sloužící primárně pro FCP s reakční dobou 200 ms téměř není schopen tuto poruchu zaznamenat, proto je nutné zamyslet se nad tím, zda je potřeba tento systém předimenzovat a zda

se vyplatí více než kombinovat bateriovou technologii se superkapacitory, či jimi tuto technologii nahradit.



Obr. 3-5 Průběh mikrovýpadku [27]

4 NÁVRH TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ PRO VYBRANÉ STAVY DS

Pro náš návrh uvažujeme systém, který disponuje točivým zdrojem. Instalací bateriového systému zlepšíme, popřípadě rozšíříme výrobu o tyto služby:

- FCP s odlehčením stávajícího zatížení;
- zajištění většího výkonu pro $MFRP_t$, kde $t=5$ min;
- Peak-shaving (snížení záloh za rezervovanou kapacitu);
- možnost BS.

4.1 Technická specifikace bateriového systému

Systém využívá technologii Li-ion, která disponuje výkonem 4 MW a kapacitou 2,5 MWh. Tento výkon a kapacita je garantována po dobu 10 let. Proto je třeba vzít v potaz znehodnocování kapacity v průběhu používání, a proto byla baterie naddimenzována na 4,1 MWh. Celková cena systému činí 60 milionů Kč. Podrobné parametry jsou k nalezení níže v Tabulka 5. Tato baterie je stejná jako již u hotového projektu v Plané nad Lužnicí u společnosti C-energy.[29]

Tabulka 5 Parametry bateriové stanice [29] – převzato a upraveno

Bateriové články		
Jmenovité napětí	3,7	V
Pracovní rozsah napětí	3,36 až 4,12	V
Kapacita	94	Ah

Bateriový modul		
Počet článků v sérii	22	ks
Jmenovité napětí	81,4	V
Maximální napětí	90,6	V
Pracovní rozsah napětí	73,9 až 90,6	V
Jmenovitá kapacita	94	Ah
Hmotnost	54	kg

Bateriová skříň		
Počet modulů v sérii	10	ks
Jmenovité napětí	823,68	V
Maximální napětí	907,39	V
Minimální napětí	739,97	V
pracovní rozsah napětí	739,97 až 907,39	V
Jmenovitá kapacita	94	Ah
Použitelná kapacita	83,05	Ah
Jmenovitá kapacita (1 C)	76,1024	kWh

Bateriová skříň		
Jmenovitý výkon	69,56	kW
Jmenovitý proud	1 C	
Maximální vybíjecí proud	1,265 C	max. 5 min
	1,22 C	trvalý
Maximální zkratový proud	7,8	kA
Samovybíjení	<3	% za měsíc
Hmotnost	610	kg
BMS	BMS skříň + BM modulu	sada

Provozní podmínky		
Provozní teplota chladícího vzduchu	(+15 ±45)	°C
Životnost	> 10	let
Počet cyklů (nabití – vybití)	6500	

Celkový čas vybití baterie, kde:

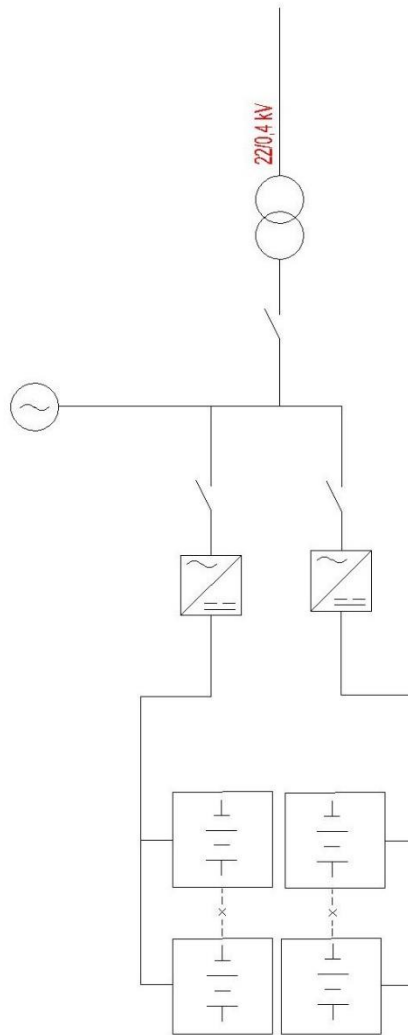
$T = \text{Čas}$ (min)

$T_{MAX} = \text{Maximální čas, po který je baterie schopna dodávat výkon}$ (min)

$P = \text{Výkon}$ (MW)

$C = \text{Kapacita}$ (MWh)

$$T_{MAX} = \frac{C}{P} \cdot 60 = \frac{2,5 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^6} \cdot 60 = 37,5 \text{ min} \quad (4.1)$$



Obr. 4-1 Ilustrační obrázek bateriové uložiče připojené do DS s točivým zdrojem [31] – převzato a upraveno

4.2 FCP s možností odlehčení stávajícího zatížení

Služba FCP se řídí dle kapitoly 3.2.1. Vycházíme-li z rovnice (3.1), kde jsou uvažovány pouze točivé zdroje. Po výpočtu (4.2) zjistíme, že minimální výkon za předpokladu, že $S = 10\%$, $f = 50\text{ Hz}$ a $\Delta f = 200\text{ mHz}$, kterým výrobná musí disponovat, je 75 MW , aby splnila minimální požadavek služby $\pm 3\text{ MW}$.

$$P_n = 3 \cdot \frac{10}{100} \cdot \frac{50}{0,2} = 75\text{ MW} \quad (4.2)$$

Za takového předpokladu je výrobná schopna regulace $\pm 3\text{ MW}$, které jsou odebrány z disponibilního výkonu celé výrobní. V případě menšího výkonu než 75 MW za stejných

předpokladů, není výrobní schopna tuto službu zajistit z důvodu nesplnění požadavků na certifikáty a testy viz kapitola 3.1.

Po instalaci bateriového uložení je výrobní schopna celý svůj výkon rozdělit do ostatních služeb. Bateriové uložení zde zastoupí zdroj a je schopna regulovat výkon o velikosti ± 3 MW.

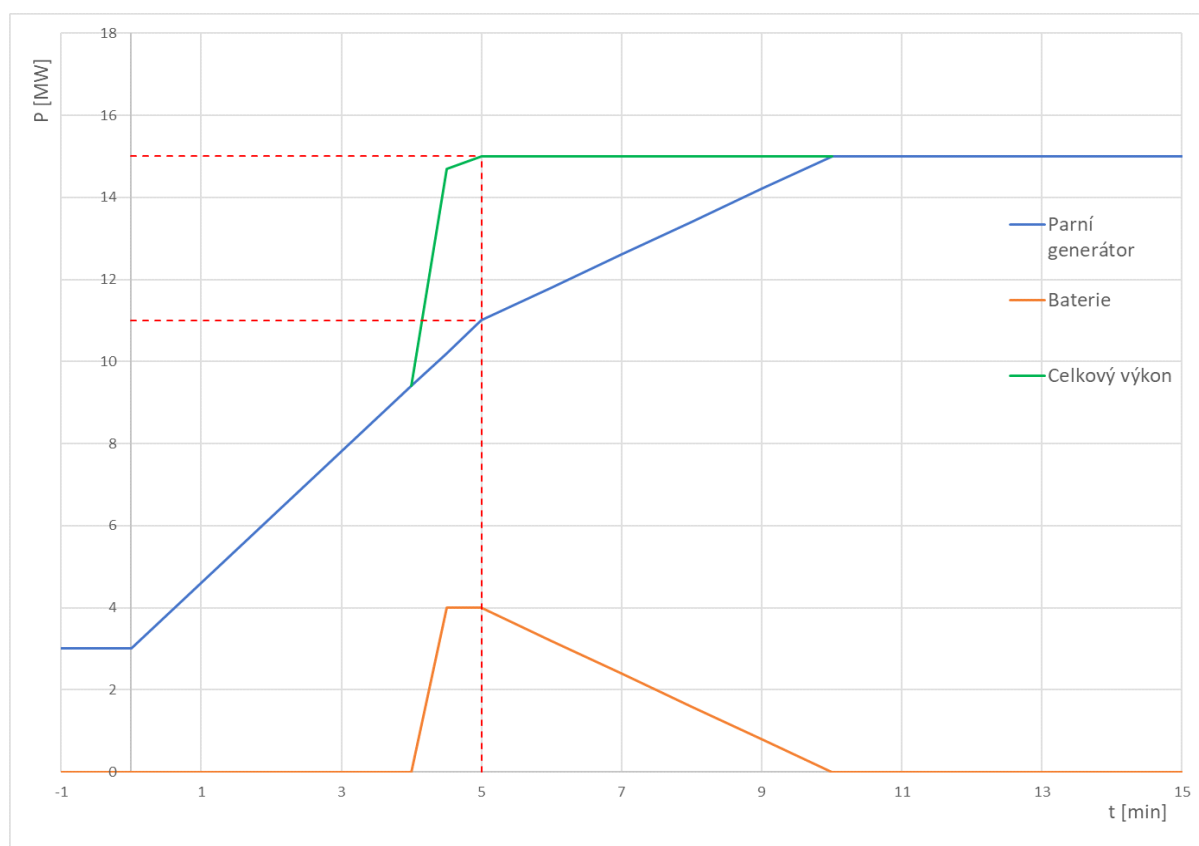
Tento proces může být přerušen po odvolání požadavku na regulaci, popřípadě po vybití uložení a převedení tohoto výkonu na točivý zdroj.

4.3 Zajištění většího výkonu pro $MFRP_t$ ($t=5$ min)

Služba $MFRP_t$ ($t=5$ min) je již definována v kapitole 3.2.3. Prezentovaný zdroj je bez bateriového uložení schopen plnit $MFRP_t$ ($t=5$ min) ve výši 8 MW, který je reprezentován (Obr. 4-2) rozdílem mezi výkonem 11 MW na parním generátoru a 3 MW, které jsou základní hodnotou výkonu. S bateriovým uložením je výrobní schopna plnit tuto službu ve výši 12 MW, které jsou reprezentovány rozdílem součtu výkonů baterie a parního generátoru 15 MW a již zmíněnými 3 MW. Celý průběh služby s i bez baterie je znázorněn na Obr. 4-2.

Baterie zde plní funkci podpory, která uvolňuje celé 4 MW během prvních 5 minut, aby byl splněn požadavek na $MFRP_t$ ($t=5$ min) ve výši 12 MW. Po dosažení tohoto požadavku je uvolňovaný výkon snižován až k dosažení výkonu generátoru na požadovanou hodnotu.

Baterie zde nevyžaduje, aby plnila roli generátoru po celou dobu plnění služby. Vyžaduje kapacitu pouze na prvních pár minut funkce. Poté je odpojena, popřípadě nabíjena, aby byla schopna poskytovat ostatní služby.



Obr. 4-2 Aplikace baterie na zvýšení výkonu pro $MFRP_t$ ($t=5$ min) [29] - převzato

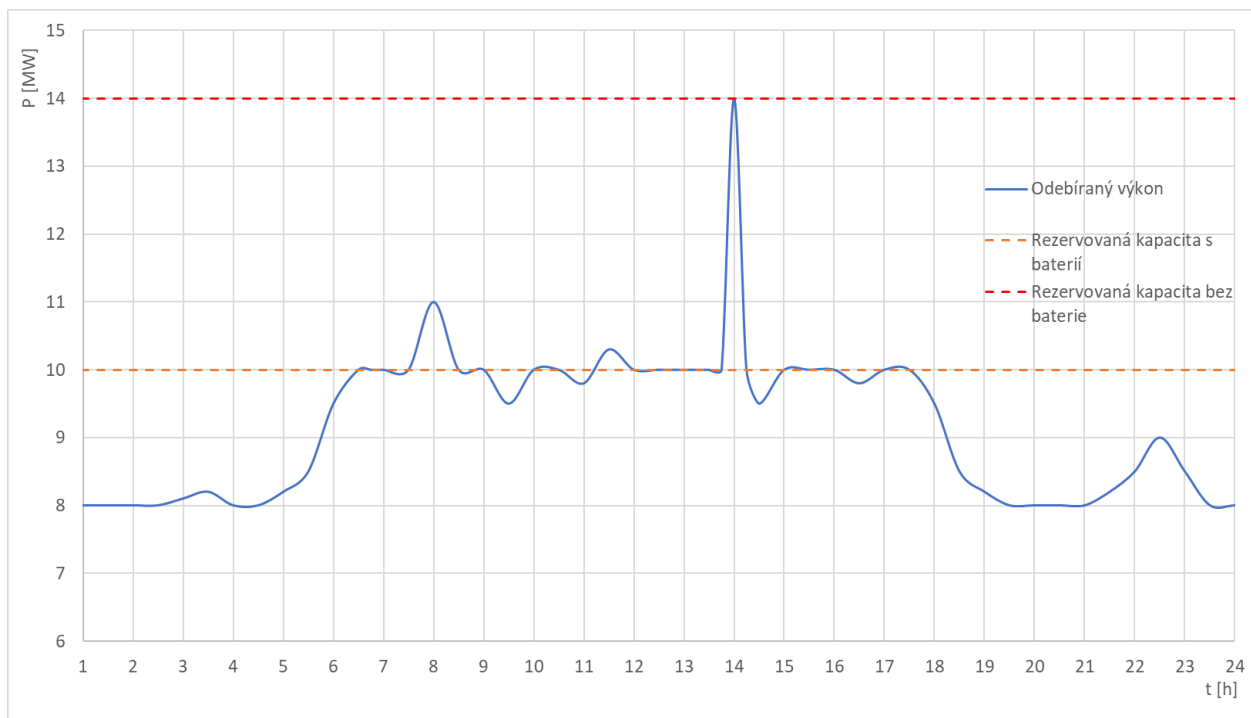
4.4 Peak-shaving

Peak-shaving může být ve výrobě využíván na rychlé a malé poklesy výkonu během běžného provozu, jak můžeme vidět na Obr. 3-2.

Užitečnější řešení můžeme vidět na Obr. 4-3. Tuto službu je baterie schopna plnit za předpokladu, že výkyvy jsou maximálně +4 MW velké a trvají nejdéle 37,5 minuty viz (4.1). Po každém výkyvu zde musí nastat dostatečně dlouhá doba, aby se baterie znovu nabila. Za těchto předpokladů je baterie schopna snížit rezervovanou kapacitu až o 4 MW, které jsou oceněny dle Tabulka 4.

Na Obr. 4-3 můžeme vidět příklad, kde je před instalováním bateriového uložení nutné rezervovat 14 MW (z důvodu velké špičky), které jsou využívány jen nahodile. S bateriovým uložštěm, které je schopno tuto špičku vyhladit, je výroba schopna snížit tuto hodnotu až na 10 MW, které jsou plně využívány a větší výkyvy jsou zde kompenzovány baterií.

Za běžného stavu je třeba tuto hodnotu určit z odběrového diagramu z delší časové doby. Běžně se používá roční odběrový diagram.



Obr. 4-3 Denní diagram – snížení rezervované kapacity

4.5 Možnost BS

Schopnost BS je přechod výroby do provozu, který vyžaduje schopnost samostatného uvedení provozovny do chodu bez vnějšího dodání elektrické energie (viz kapitola 3.3.3).

Bez bateriové stanice je tato podmínka např. pro uhelný zdroj těžko splnitelná, protože není schopna nijak napájet vlastní spotřebu bez cizí pomoci. Bateriová stanice není schopna pomoci rozběhnout větší uhelné zdroje z důvodů velkých nároků na výkon a dlouhé časové pochody (např. přehřátí kotlů). Proto je nutné takový zdroj rozšířit o menší zdroj, který bude baterie schopna uvést do provozu a dále rozběhnout i větší zdroje.

Baterie parametrů z bodu 4.1 je schopna přehřát a rozběhnout plynový generátor, který dále uvede do provozu větší soustrojí a dohromady utvoří OP (dle kapitoly 3.3.2).

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDNÉHO ŘEŠENÍ

Jednotlivé služby jsou ohodnoceny odlišně pro různé výroby. Záleží na způsobu vyrábění elektrické energie, velikosti poskytování jednotlivých služeb a jejich množstvích.

Řešení jednotlivých služeb:

Dále budou jednotlivé služby z kapitoly 4 popsány z ekonomického a technického hlediska.

FCP s možností odlehčení stávajícího zatížení

Budeme-li vycházet z hodnoty 75 MW ze vztahu (4.2), je velmi důležité, zda budeme pro danou regulaci používat jen baterii, či budeme po nějakém čase regulaci předávat jinému zdroji. V případě regulace 3 MW je doba pro vybití baterie 50 minut (obdobně jako 4.1).

$$T_{MAX} = \frac{C}{P} \cdot 60 = \frac{2,5 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6} \cdot 60 = 50 \text{ min} \quad (5.1)$$

Tomuto času bude potřeba přizpůsobit točivý zdroj, aby byla podmínka regulace dodržena.

Výdělek této služby je možný, ale je pro každý výrobní celek odlišný. Proto je velmi těžké tyto informace získat.

Pro vykonávání této služby je důležité disponovat systémem, který dokáže vzorkovat frekvenci dostatečně rychle, aby včas zajistil aktivaci služby a dodržel všechny potřebné požadavky viz kapitola 3.2.1.

Zajištění většího výkonu pro $MFRP_t$ ($t=5 \text{ min}$)

Hlavním požadavkem na tuto službu je, zda bateriový systém dokáže dodávat energii po celou dobu náběhu generátorů podílejících se na této službě. Z příkladu na Obr. 4-2 je patrné, že kapacita bateriového uložení je pro tento příklad dostačující.

Ekonomický dopad na tuto službu je za použití baterie jistý, jelikož dokáže během velmi krátké doby (viz Obr. 4-2) zvýšit velikost služby o 1/3 celkového výkonu (z 8 MW na 12 MW). Přesné ohodnocení je pro provozovny různé, proto je těžké získat přesné hodnoty.

Pro tuto službu je důležité, aby bateriové uložení bylo schopno dodat výkon do požadovaného času 5 minut. Po dosažení musí být schopno udržet požadovaný výkon po dobu náběhu hlavních generátorů. Pro baterii o výkonu 4 MW a kapacitě 2,5 MWh je doba (viz 4.1) pro vybití baterie při maximálním výkonu 37,5 minuty dostačující.

Peak-shaving

Za ideálních předpokladů, kdy jsou výkyvy dlouhé maximálně 37,5 minuty (viz. 4.1) a je mezi nimi dostatečně dlouhá doba, aby byla baterie schopna se znovu nabít, je zde možnost snížit instalovanou kapacitu až o 4 MW (viz Obr. 4-3).

Kalkulace této služby vychází z ideálního předpokladu pro snížení kapacity 4 MW a Tabulka 4 pro dodavatele E.ON Distribuce, a.s. a instalaci systému v DS (2 řádek pro VN), dále nepočítá s inflací, s náklady na údržbu, na certifikace, testy ani školením pracovníků.

1. Příklad pro výnosnost systému s nákupem rezervované kapacity každý měsíc.

Tabulka 6 Výnosnost systému s měsíční rezervací

Cena za rezervovanou kapacitu	177 903	Kč/MW a měsíc
Počet měsíců	12	-
Rezervovaná kapacita bez baterie	12	MW
Rezervovaná kapacita s baterií	8	MW
Cena za rok bez baterie	25 618 032,00	Kč
Cena za rok s baterií	17 078 688,00	Kč
Rozdíl	8 539 344,00	Kč
Návratnost bateriového systému při celkové ceně 60 milionů	7,03	let

2. Příklad pro výnosnost systému s nákupem rezervované kapacity na celý rok.

Tabulka 7 Výnosnost systému s roční rezervací

Cena za rezervovanou kapacitu	158 223	Kč/MW a měsíc
Počet měsíců	12	-
Rezervovaná kapacita bez baterie	12	MW
Rezervovaná kapacita s baterií	8	MW
Cena za rok bez baterie	22 784 112,00	Kč
Cena za rok s baterií	15 189 408,00	Kč
Rozdíl	7 594 704,00	Kč
Návratnost bateriového systému při celkové ceně 60 milionů	7,90	let

Příklady výpočtů pro tabulku 6 (pro tabulku 7 jsou stejné jen s odlišnou cenou za rezervovanou kapacitu), kde:

P = Cena za rezervovanou kapacitu	(Kč/MW a měsíc)
n = Počet měsíců	(-)
C = Rezervovaná kapacita bez baterie	(MW)
C _B = Rezervovaná kapacita s baterií	(MW)
TP = Celková cena bateriového systému	(Kč)
YP = Cena za rok bez baterie	(Kč)
YP _B = Cena za rok s baterií	(Kč)

M = Rozdíl (Kč)

R = Návratnost bateriového systému při celkové ceně 60 milionů (let)

$$YP = P \cdot n \cdot C = 177\,903 \cdot 12 \cdot 12 = 25\,618\,032,00 \text{ Kč} \quad (5.2)$$

$$YP_B = P \cdot n \cdot C_B = 177\,903 \cdot 12 \cdot 8 = 17\,078\,688,00 \text{ Kč} \quad (5.3)$$

$$M = YP - YP_B = 25\,618\,032 - 17\,078\,688 = 8\,539\,344,00 \text{ Kč} \quad (5.4)$$

$$R = \frac{TP}{M} = \frac{60\,000\,000}{8\,539\,344} = 7,03 \text{ let} \quad (5.5)$$

Z výpočtu je viditelné, že bateriový systém začne při poskytování této služby vydělávat po 7,03 letech za předpokladu nakupování záloh na kapacitu měsíčně, při smlouvené rezervované kapacity na celý rok je návratnost 7,9 let.

BS – start ze tmy

Za předpokladu, že výrobní firma disponuje generátorem, který je schopný za pomoci bateriového uložení uvést do chodu hlavní generátory, je služba BS proveditelná. Technické požadavky pro tuto službu vycházejí z kapitoly 3.3.3 a následného převodu na ostrovní provoz 3.3.2.

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zvolit vhodný druh akumulace elektrické energie a následně jej aplikovat na systém, kde bude plnit funkci podpůrných služeb.

V první části bakalářské práce byla zvolena bateriová akumulace, která je svým charakterem a požadavky na prostorovou rozlohu nejvhodnějším řešením. V další části byly popsány podpůrné služby, které mohou být poskytovány účastníky distribuční soustavy. Poslední část byla zaměřena na možná řešení poskytování podpůrných služeb výrobnou disponující točivým zdrojem a jejich význam na výhodnosti aplikace akumulační jednotky.

Výsledná volba bateriového akumulačního systému typu Li-ion byla založena na základě výhod této technologie. Mezi tyto výhody patří zejména: velká měrná energetická hustota, energetická hustota a měrný výkon.

Pro výrobu s točivým zdrojem byly vybrány zejména ty služby, které je akumulační jednotka schopna zvládat sama, nebo s nimi ve velké míře vypomáhat. Pro akumulaci byla použita jednotka se stejnými parametry, jako se nachází v teplárně v Plané nad Lužnicí u společnosti C-energy. Tato jednotka je v návrhu používána k odlehčení stávajícího zatížení v podobě pomoci při vykonávání jiných služeb. S tímto odlehčením je provozovna schopna poskytovat více služeb v jeden okamžik. S další službou $MFRP_t$ ($t=5$ min) je systém schopen zvýšit svůj maximální dodávací výkon až o 4 MW. V případě Peak-shavingu je výroba schopna ušetřit až 4 MW na rezervované kapacitě. V poslední aplikaci je akumulace schopna výrobně pomoci při startu ze tmy.

Ze všech služeb, které je tato akumulace schopna poskytovat, byly podrobnější informace k posouzení návratnosti systému dostupné pouze u Peak-shavingu. Za ideálních předpokladů využívání celých 4 MW výkonu baterie s neuvažováním inflace a nákladů na údržbu je návratnost 7,03 až 7,9 let. Z praxe je známo, že je tato hodnota chybná, protože běžně se návratnost systému pohybuje mezi 15 až 20 lety, někdy se může stát, že se systém pro dané aplikace vůbec nevyplatí. Proto je třeba akumulační jednotku využívat co nejvíce způsoby, aby byla schopna návratnost snížit na co nejkratší dobu.

Pro aplikace, na které byla práce zaměřena je Li-ion technologie dostačující, v případě větších požadavků na kapacitu (např. Peak-shaving u FVE) může být výhodnější použití průtočných baterií, které mají výhodu zejména ve velkém počtu cyklů.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] How does a Supercapacitor Work. *Battery University* [online]. 17.04.2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor
- [2] LocalEnergies: Ochrana proti mikrovýpadkům [online]. 2020 Local Energies, a.s, třída 3. května 1173, Malenovice, 763 02 Zlín [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.localenergies.cz/microoutages-stabilizace-napeti/>
- [3] ENERGIE ZE VŠECH STRAN: ENCYKLOPEDIE ENERGETIKY. CEZ [online]. Praha, 2011 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2014/05-kveten/encyklopedie_energie-ze-vsech-stran_e.pdf
- [4] Alternative Energy Storage Methods: SMES. *The Electopedia: Battery and Energy Technologies* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/alternatives.htm#smes>
- [5] E.ON Energy Globe: EEG 2017: k čemu je dobrá setrvačnicková baterie? [online]. 2017 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.energyglobe.cz/temata-a-novinky/rozhovor-s-vitezem-kategorie-napad-souteze-e-on-energy-globe-ktery-vyvijsi-originalni-baterii-pro-elektromobily>
- [6] Fact Sheet: Energy Storage: Energy Storage Today. *Environmental and Energy Study Institute* [online]. Washington, DC, 22.02.2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>
- [7] *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, [online]. In: Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2017 [cit. 2019-12-20]. ISBN 978-92-9260-038-9 (PDF). Dostupné z: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf
- [8] Alternative Energy Storage Methods: Molten Salt – A Thermal Battery. *The Electopedia: Battery and Energy Technologies* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/alternatives.htm#salt>
- [9] Alternative Energy Storage Methods: Pumped Storage - The Hydraulic Battery. *The Electopedia: Battery and Energy Technologies* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/alternatives.htm#hydraulic>
- [10] Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren. *Nalezeno.cz* [online]. 3.5.2011 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elektřiny-z-fotovoltaických-a-větrných-elektřáren.aspx>
- [11] Palivové články. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. Napsal Petr Dlouhý, Luděk Janík, 17.4.2007 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/clanky/kategorie-clanku/clanky/587-palivove-clanky>
- [12] Hydrogen Fuelled Electricity Generation: Fuel Cells. *The Electopedia: Battery and Energy Technologies* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: https://www.mpoweruk.com/hydrogen_fuel.htm

- [13] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 8086534030.
- [14] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [15] New Lead Acid Systems. *Battery University* [online]. 3.5.2011 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/new_lead_acid_systems
- [16] Types of Lithium-ion. *Battery University* [online]. 10.7.2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [17] Flow Batteries. *The Electopedia: Battery and Energy Technologies* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/flow.htm>
- [18] RADIL, Lukáš. *Eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=70656
- [19] Types of Lithium-ion. *Battery University: Battery and Energy Technologies* [online]. 10.7.2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [20] Fact Sheet: Energy Storage: Energy Storage Today. *Environmental and Energy Study Institute* [online]. Washington, DC, 22.02.2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>
- [21] Ing. Stanislav Pekárek. *Technologie oprav I: Učebnice pro 2. a 3. ročník oboru Opravář zemědělských strojů* [online]. Střední škola technická a zemědělská, NOVÝ JIČÍN, 2016 [cit. 2019-11-20]. ISBN 978-80-88058-23-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/160/Impresum.html>
- [22] How do Lithium Batteries Work. *Battery University* [online]. 1.6.2018 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries
- [23] *Pravidla provozování přenosové soustavy: KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY Část II. Podpůrné služby (PpS)* [online]. ČEPS, 2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/podpurne-sluzby>
- [24] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 7* [online]. ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD, 2018 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/>
- [25] E.ON Energy Globe: Nápad z E.ON Energy Globe: baterie podle přání [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.energyglobe.cz/temata-a-novinky/s-jirim-vranou-o-technologie-vanadovych-redoxnich-prutocnych-baterii>
- [26] RADIL, L. *Eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2013.

-
- [27] *SUPERKAPACITOR A DOPAD JEHO PROVOZU NA ELIMINACI VÝPADKŮ VÝROBY PRŮMYSLO-VÉHO ZÁVODU* [online]. Konference ČK CIRED 2019: Martin Kurfiřt, Jan Jiříčka, Martin Kašpírek, E.ON Distribuce, 2019 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.ckcired.cz/>
- [28] *Energetický regulační VĚSTNÍK: Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu* [online]. ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD, 2019 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.eru.cz>
- [29] Osobní konzultace Ing. Josef Havlík C-Energy [cit. 2020-05-22]
- [30] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 7* [online]. ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD, 2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/>
- [31] *Analýza možností využití akumulace pro PDS* [online]. Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií: Technická 3058/10 616 00 Brno, 2017 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/vav/projekty/detail/27937>